La materia oscura

En las últimas décadas se ha constatado que un tipo nuevo de materia, radicalmente distinta a la tradicional, se extiende por todo el universo. Llamada «oscura» por lo difícil que resulta detectarla, es mucho más abundante que la materia ordinaria. Junto con la no menos misteriosa «energía oscura», constituye el 95% del contenido total del cosmos. Tal es su densidad que de ellas depende el destino de todo el universo. Las investigaciones acerca de su naturaleza prometen abrir nuevos horizontes a nuestra comprensión de la realidad.

Alberto Casas es director del Instituto de Física Teórica
y profesor investigador del CSIC.

LA MATERIA OSCURA

RBA

La materia oscura

El elemento más misterioso del universo



Imagen de cubierta: Recreación artística, en azul, del halo o espiral de materia oscura, de ordinario invisible, que rodea el cúmulo galáctico CI 0024+17.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: M. Blanton/Sloan Digital Sky Survey: 99; European Space Agengy/Planck Collaboration: 78-79; Lamestlamer: 117; Museo Histórico de Berna, Suiza: 45; NASA/CXC/M. Weiss: 55a, 55b; NASA, ESA, M.J. Jee y H. Ford (Universidad Johns Hopkins): portada; NASA, ESA, STScI: 51a, 107; Science Photo Library/Age Fotostock: 26-27, 33, 102-103; W.N. Colley y E. Turner (Universidad de Princeton), J.A. Tyson (Bell Labs, Lucent Technologies), NASA/ESA: 51b.

ISBN: 978-84-473-8301-6
Depósito legal: B-16873-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

El descubrimiento tanto de la *materia oscura* como de la *energía oscura* supone uno de los acontecimientos científicos más importantes de los últimos tiempos. Para hacemos una idea de su trascendencia hay que pensar que estas dos misteriosas sustancias constituyen el 95% del contenido del universo. El 5% restante es la *materia ordinaria*, de la que están hechas las estrellas, los planetas, el gas y el polvo cósmico... y nosotros mismos. Hasta hace no mucho, creíamos que esta materia ordinaria era todo lo que había en el universo; ahora sabemos que es solo una parte muy modesta.

Pero la materia y la energía oscuras no solo son importantes por ser tan abundantes; lo son también porque son *diferentes*. Las teorías actuales de la física de partículas describen de forma excelente el comportamiento y las propiedades de la materia ordinaria, pero son insuficientes para entender la existencia y características de la materia y la energía oscuras. Por tanto, cuando seamos capaces de describirlas con precisión esperamos comprender aspectos nuevos y profundos, tal vez revolucionarios, acerca del universo.

Hasta el momento la presencia de estos dos ingredientes mayoritarios del cosmos se ha puesto de manifiesto gracias a los

efectos gravitatorios que producen en su entorno, localmente, y en el universo como un todo. Las evidencias, como veremos, son realmente abrumadoras, sobre todo en el caso de la materia oscura, pero aún carecemos de una detección directa que nos informe sobre sus características concretas. Así que puede decirse que estamos «a medio camino» de su descubrimiento, y por ello en un momento excitante, tanto desde el punto de vista teórico como desde el experimental y observacional.

Puede compararse esta situación con la época de los grandes navegantes y descubridores del Renacimiento. Europa empezaba a ser consciente de que no era el centro del mundo, sino solo una parte más, y no de las más grandes. Se sabía muy poco del resto: había muchas zonas inexploradas y lo que pudiera haber en ellas era una incógnita. Paradójicamente, a la vez que se estaba conociendo mejor cómo era realmente el mundo, este se hacía más misterioso... y también más prometedor. Al fin y al cabo, esa «terra incógnita» no dejaba de ser una oportunidad, dependiendo de lo que contuviese y cómo se aprovechara.

De manera semejante, sabemos que la materia y la energía oscuras están ahí, aunque todavía ignoramos mucho sobre su naturaleza. Y no solo están *ahí* fuera, sino también *aquí,* entre nosotros, ya que se extienden por todo el universo. Su enigmática presencia despierta nuestra curiosidad y nos transmite con fuerza el mensaje de que nuestro conocimiento de la naturaleza es incompleto. Por ello, su estudio representa una gran oportunidad para conocer mejor los entresijos más profundos de la naturaleza. Esta es la razón esencial por la que la comunidad científica las está investigando intensiva y apasionadamente, tanto desde el punto de vista teórico como observacional.

La materia y la energía oscuras comparten algunas características: son invisibles, son muy abundantes y están por todas partes. Pero, en realidad, son radicalmente diferentes entre sí.

La materia oscura está distribuida de manera desigual en el universo, formando nubes gigantescas de densidad variable dentro y alrededor de las galaxias, y, en menor medida, en otras zonas aparentemente «vacías», por las que se extiende como jirones de niebla. Según las últimas estimaciones, la materia oscura representa aproximadamente el 27% del contenido total del universo, siendo por tanto cinco o seis veces más abundante que la materia ordinaria. Posiblemente está constituida por algún tipo de partículas elementales o cuasi elementales, aún desconocidas, que están ahora mismo atravesando nuestros cuerpos con un flujo de miles de partículas por segundo, quizá muchas más.

Aunque existían indicios anteriores, las primeras pruebas sistemáticas de la presencia de la materia oscura fueron obtenidas en los años setenta del siglo pasado, observando su potente efecto gravitatorio sobre las estrellas que orbitan en la periferia de las galaxias. Pero incluso entonces se dudó de su existencia, ya que esos efectos gravitatorios podrían deberse tal vez a que la ley de gravitación universal de Newton no fuera válida a esas distancias gigantescas. De hecho, desde el trabajo excepcional de Einstein se sabe que la ley de Newton no es correcta en ciertas situaciones. Sin embargo, en este caso hay pruebas convincentes de que la materia oscura está realmente ahí. Como veremos, estas evidencias provienen del estudio de situaciones cósmicas singulares, como choques de cúmulos galácticos, que suponen auténticos experimentos naturales de dimensión colosal.

Por otro lado, se planteó también la duda de si la materia oscura no sería en realidad materia ordinaria que hubiese adoptado una forma difícil de detectar; por ejemplo, pequeños planetoides vagando por el espacio interestelar e intergaláctico. Sin embargo, esta posibilidad está prácticamente descartada. Para entenderlo, nos remontaremos a los primeros instantes de vida del universo, la época del Big Bang. Aquella gran explosión dejó tras de sí reliquias que aún podemos observar en el universo y que certifican lo ocurrido en aquel periodo primitivo y violento. Por ejemplo, cuando se formaron los primeros átomos el universo se volvió transparente y lleno de luz. Esa luz ha llegado hasta nuestros días en la forma de un débil fondo de radiación de microondas, que se detectó por vez primera en 1964. Pues bien, la materia oscura estaba ya presente en aquella época remota y dejó unas huellas inconfundibles en ese fondo de radiación, de forma semejante a las huellas que dejaría un imaginario hombre invisible caminando sobre la nieve. El estudio de estas

huellas, realizado ya en el siglo XXI, ha proporcionado información valiosísima sobre la naturaleza de la materia oscura, y que virtualmente excluye la posibilidad de que se trate de materia ordinaria.

Pero entonces, ¿qué es la materia oscura? Para acercamos a esta cuestión, repasaremos lo que conocemos sobre la materia ordinaria, la cual también encierra secretos y rompecabezas teóricos fascinantes. La solución a estos rompecabezas parece requerir la existencia de física nueva aún desconocida, pero para la que hay propuestas apasionantes, por ejemplo la existencia de dimensiones espaciales extras (además de las tres ordinarias). Es posible que la materia oscura sea una consecuencia de esa nueva física, y de hecho, como veremos, los candidatos más estudiados surgen de estas propuestas teóricas.

En todo caso, la comunidad científica está realizando un gran esfuerzo por detectar la materia oscura siguiendo distintas estrategias y realizando experimentos de tipos muy diversos, situados, por ejemplo, en minas profundas, en el hielo del polo Sur o en sondas espaciales. Además, puede que se consiga producirla artificialmente en los aceleradores de partículas modernos, como el LHC. Aunque la deseada detección directa no haya ocurrido todavía, estos esfuerzos experimentales no han sido en vano. Ahora sabemos muchas cosas que la materia oscura *no* puede ser; de lo contrario ya habría sido detectada.

Por su parte, la energía oscura es aún más extraña. Consiste en una especie de energía asociada al propio espacio, que llena de manera uniforme todo el universo, incluso los espacios aparentemente vacíos. Podemos imaginarla como un campo (semejante al campo eléctrico pero con características distintas) que llena el cosmos de forma homogénea. Aunque su densidad es realmente minúscula —en el volumen de la Tierra hay solo unos 7 mg de energía oscura—, el hecho de que se extienda por los grandes espacios aparentemente vacíos del cosmos hace que su contribución total sea muy significativa, representando aproximadamente un 68% del contenido del universo (el 32% restante es la suma de la materia oscura y la ordinaria). Las primeras indicaciones de su existencia se obtuvieron en 1998, cuando, contra todo pronóstico, se observó que el universo estaba acelerando su ritmo de expansión, un efecto que no puede causar la materia, ni ordinaria ni oscura.

La energía oscura es el ingrediente más abundante del universo, y el que marcará su destino, ya que la expansión acelerada que produce terminará por separar las galaxias de forma tan extrema que solo las más cercanas permanecerán visibles. El resto desaparecerá de nuestro universo observable a todos los efectos. Los futuros habitantes de nuestra galaxia contemplarán un cosmos completamente vacío y oscuro.

Explicar el origen y la abundancia de la energía oscura supone un reto extraordinario para la física. Las posibles explicaciones que ahora mismo maneja la comunidad de física teórica entran de lleno en el campo de la especulación. Entre ellas está la noción de *multiverso*. Cabe la posibilidad de que la evolución cósmica haya generado zonas en el universo desconectadas unas de otras y con propiedades físicas diferentes (de ahí la palabra multiverso). El hecho de que los seres humanos solo podamos existir en un universo con las propiedades adecuadas para el surgimiento de la vida (lo que se conoce como el *principio antrópico*) podría explicar la abundancia de energía oscura que observamos, y también otras propiedades intrigantes de las leyes físicas. Un multiverso así pudo haber sido generado por otro proceso de expansión acelerada, semejante al que estamos viviendo ahora, pero ocurrido al comienzo del universo y de una magnitud colosal. En un escenario de este tipo, denominado universo inflacionario, nuestro universo particular sería una burbuja habitable dentro de un «océano» espacial que podría seguir expandiéndose indefinidamente de manera vertiginosa. En este hipotético caso nuestro universo se apagará, pero la producción de nuevas burbujas, es decir nuevos universos, continuará eternamente. Se trata de hipótesis audaces, cierto, pero la historia de la ciencia nos ha enseñado que, a menudo, la realidad supera la más atrevida de nuestras conjeturas.

CAPÍTULO 1

El descubrimiento de la materia oscura

El primer indicio de la existencia de la materia oscura se obtuvo gracias a un método ya desarrollado por Newton para determinar la masa de la Tierra y del Sol. Se trata de un ejemplo soberbio de la mejor ciencia, y también de la más bella.

La Tierra tiene una masa de unos seis cuatrillones de kilogramos (un 6 seguido de 24 ceros). Esto se sabe desde hace más de doscientos años, pero ¿cómo se supo? Desde luego, no era posible poner la Tierra en el platillo de una balanza. Tampoco era muy útil hacer una estimación de la densidad media de la Tierra para multiplicarla por su volumen y así deducir su masa. Aunque el tamaño de la Tierra era bastante bien conocido desde el griego Eratóstenes en el siglo ii a.C., no se sabía nada acerca de su densidad, excepto en lo que concierne a la corteza terrestre, que es una parte mínima del volumen total del planeta. Ciertamente, hoy en día conocemos bien el interior de la Tierra y podemos estimar correctamente su densidad media, pero hace siglos se desconocía completamente ese misterioso interior, ¡incluso había quien sostenía que estaba hueca!, por lo que era imposible hacer una suposición sensata sobre su densidad. Entonces, ¿cómo se pudo determinar la masa de nuestro planeta? El método para hacerlo se lo debemos al ingenio extraordinario de Isaac Newton, y merece la pena recordarlo.

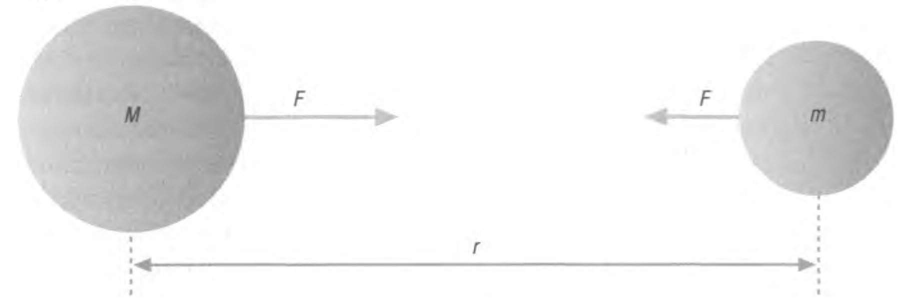
La famosa *ley de gravitación universal*, establecida por Newton alrededor de 1665, afirma que dos cuerpos cualesquiera se

atraen con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa (figura 1). En otras palabras, para calcular esa fuerza no tenemos más que multiplicar las dos masas, dividir por el cuadrado de la distancia y multiplicar ese resultado por una constante de proporcionalidad, llamada constante de Newton, la cual suele denominarse por la letra G. Es importante recordar que *G* es una constante universal: siempre es la misma, en cualquier lugar del espacio y sean cuales sean los cuerpos que se atraen.

Si se reflexiona sobre ella, la ley de gravitación universal es sumamente misteriosa: ¿por qué diablos se tienen que atraer los cuerpos, y por qué lo hacen con la intensidad que lo hacen? ¿Y cómo «sabe» un cuerpo de la presencia de otro a una gran distancia y que por tanto debe sentirse atraído por él? ¿Es que se mandan señales? Estas preguntas no tenían respuesta en la época de Newton (más adelante comentaremos la perspectiva moderna sobre ellas).

Consideremos ahora el efecto que produce la fuerza gravitatoria en los cuerpos que la sufren. Según la segunda ley de la mecánica (¡también establecida por Newton en los mismos años!), el efecto de una fuerza sobre un cuerpo es producir una aceleración. Numéricamente, esa aceleración es igual a la fuerza ejercida sobre el cuerpo, dividida por su masa. Dado que la fuerza gravitatoria es proporcional a la masa del objeto, al dividirla por esta última se obtiene que la aceleración producida es independiente de la masa del objeto acelerado. Por ejemplo, la Tierra acelera del mismo modo dos cuerpos situados a la misma distancia, aunque uno sea la Luna y el otro una piedra.

Podemos aplicar esta ley a los objetos ordinarios que están cerca de la superficie terrestre, y que caen atraídos por la Tierra. Para todos ellos la masa que les atrae es la misma, y también es (aproximadamente) igual la distancia de separación, ya que coincide con el radio terrestre, unos 6370 km. Por tanto, la aceleración que experimentan ha de ser la misma. Y en efecto, cerca de la superficie terrestre todos los objetos, con independencia de su masa, caen con la misma aceleración. Este hecho había sido ya observado por Galileo medio siglo antes que



Representación gráfica de la ley de gravitación universal. La fuerza F con la que se atraen dos cuerpos de masas M y *m*, separados por una distancia *r*, está dada por la fórmula

$$F = G\frac{M \cdot m}{r^2},$$

donde *G* es una constante, llamada constante de Newton. *G* es siempre la misma, sean los cuerpos que sean y sea cual sea la distancia de separación ($G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ $m^3/kg \cdot s^2$). La aceleración que sufre el cuerpo de masa *m* está dada por la relación $a = F/m$, es decir

$$a = G\frac{M}{r^2}.$$

Hay que notar que esta aceleración no depende de la masa *m* del objeto acelerado, ya que *m* no aparece en la última ecuación. La aceleración gravitatoria solo depende de la masa *M* del objeto que produce la atracción y de la distancia r entre ellos. Cuanto más grande es *M* y más pequeño r, mayor es la aceleración generada. Todos los objetos cerca de la superficie terrestre sufren la misma aceleración, ya que son atraídos por la misma masa (*M* = masa de la Tierra) y desde la misma distancia (*r* = radio de la Tierra).

Newton, y experimentalmente se sabía que esa aceleración es de 9,8 m/s^2.

Notemos que el valor de esta aceleración depende solo de la masa de la Tierra, del radio terrestre y de la constante de proporcionalidad *G*. Dado que el radio terrestre era conocido, Newton pudo deducir cuál debía ser la masa de la Tierra para que la aceleración de la gravedad en su superficie coincidiera con el valor experimental. Sin embargo, para realizar el cálculo, Newton necesitaba saber el valor de la constante de proporcionalidad, G, que aún no se conocía. Por ello, tuvo que contentarse con calcular el valor del producto de G por la masa de nuestro planeta, pero no ambos por separado. No obstante, el propio Newton pro-

puso un método para determinar *G:* medir la fuerza gravitatoria que se ejercen dos pesadas bolas metálicas a una distancia corta. Esta fuerza está dada también por la ley de gravitación universal. Como en el experimento propuesto se conocen las masas y la distancia entre ellas, midiendo la fuerza producida podemos deducir el valor de la constante de proporcionalidad, *G.*

La primera persona que consiguió hacer esto, usando dos bolas de plomo, fue Henry Cavendish en 1798, más de un siglo después de la propuesta de Newton. Una vez conocido G, Cavendish pudo finalmente determinar la masa de la Tierra, es decir los seis cuatrillones de kilogramos. Por cierto, la densidad media de la Tierra resulta ser unas 5,5 veces la densidad del agua.

ÓRBITAS

Acabamos de ver cómo, siguiendo el procedimiento de Newton, se pudo determinar la masa de nuestro planeta. Sin embargo, nuestro objetivo es determinar la masa de una galaxia entera (o de estructuras incluso más grandes, como cúmulos de galaxias), ya que es en esas escalas donde se puede apreciar la contribución de la materia oscura a la masa total. Pero, naturalmente, para calcular la masa de una galaxia no podemos seguir exactamente el procedimiento anterior: no podemos viajar hasta el borde de la galaxia para dejar caer un objeto y medir su aceleración de caída hacia el centro galáctico. De hecho, tampoco podemos seguir ese método para entes más modestos, como el Sol. Entonces, ¿cómo puede hacerse? La clave está en las órbitas seguidas por los objetos que giran alrededor de las grandes masas que queremos conocer. Por ejemplo, estudiando las órbitas de los planetas se puede deducir la masa del Sol. El ingenioso método para conseguirlo fue desarrollado por el propio Newton, cuyos pasos seguimos a continuación.

Consideremos primero el sistema formado por la Tierra y la Luna. Newton fue la primera persona en comprender que el giro de la Luna alrededor de la Tierra está simplemente causado por la fuerza de la gravedad que la Tierra ejerce sobre ella. Pensemos en un portero de fútbol dando una fuerte patada a un balón, haciendo que este describa una trayectoria curva: mientras avanza, primero sube y luego baja. Si no existiera la gravedad, el balón seguiría simplemente una trayectoria recta y escaparía de la Tierra. La fuerza gravitatoria, ejercida por la Tierra, es la responsable de curvar su trayectoria. En la jerga de los físicos, el balón sigue una trayectoria de *caída libre* (aunque primero suba y luego baje). Lo que se quiere indicar con ello es que la única fuerza que sufre el balón, después de recibido el primer impulso, es la de la gravedad. Exactamente del mismo modo, la Luna está sencillamente en caída libre. Es como si en un comienzo hubiera recibido una patada tan colosal que la curva que sigue tiene un radio mayor que el de la propia Tierra, por lo que describe una circunferencia gigantesca alrededor de ella: la órbita lunar. Al ser una trayectoria cerrada, la Luna la recorre una y otra vez, o sea, sigue cayendo «eternamente».

Newton no solo tuvo esta intuición genial, sino que la demostró matemáticamente. La idea es la siguiente: la Luna sigue una trayectoria curva, por lo que la dirección en la que apunta su velocidad cambia continuamente. Por tanto la Luna está experimentando una aceleración, llamada *aceleración centrípeta* por estar dirigida hacia el centro de la circunferencia (figura 2). Tal como demostró el propio Newton (y un poco antes el físico holandés Christiaan Huygens) la aceleración centrípeta depende solo de la velocidad del objeto que gira y del radio de la circunferencia que describe (concretamente, es igual al cuadrado de la velocidad dividido por el radio de giro). Dado que, tanto la velocidad de la Luna como su distancia a la Tierra eran conocidas, era posible determinar el valor de la aceleración centrípeta de la Luna. Por otro lado, una aceleración está siempre causada por una fuerza. La idea de Newton fue que la fuerza causante de la aceleración centrípeta de la Luna era simplemente la fuerza de la gravedad ejercida por la Tierra sobre ella. En otras palabras, la aceleración centrípeta de la Luna debía coincidir con la aceleración gravitatoria. Pero esto solo se cumple si la velocidad de la Luna tiene un valor preciso, que se deduce de igualar la expresión de la aceleración centrípeta

con la de la aceleración gravitatoria. Concretamente, la velocidad de la Luna debía ser

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}. \qquad [1]$$

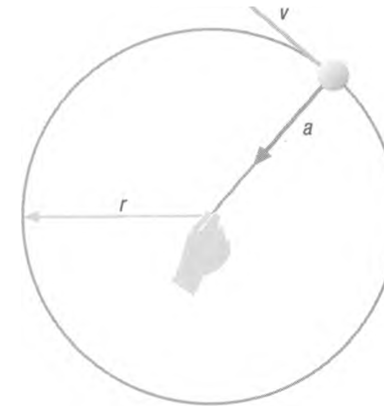
Es importante notar que esta ecuación es simplemente una consecuencia de la ley de gravitación universal de Newton, y en realidad es válida para cualquier cuerpo orbitando alrededor de una gran masa *M* a una distancia *r*. Para el caso de la Luna, su distancia a la Tierra era conocida desde los tiempos de Aristarco de Samos, en el siglo iii a.C. Por otro lado, Newton no conocía el valor de *G* ni el de *M* por separado, pero (como vimos anteriormente) sí había podido determinar el valor de su producto, *G M*, que es precisamente la cantidad que aparece en la ecuación anterior. Si efectivamente la Luna está en caída libre, su velocidad ha de ser necesariamente la que nos indica esta ecuación. ¡Y lo es! El propio Newton pudo comprobar, para su satisfacción, que la velocidad predicha para la Luna coincidía con la observada, obteniendo así una confirmación de que su ley de gravitación no se cumplía solo en la superficie terrestre, sino también en distancias planetarias, lo que le dio una enorme confianza en su universalidad.

Es interesante mencionar que Newton realizó este trabajo excepcional sobre el movimiento de la Luna en 1666, al poco tiempo de proponer su ley de gravitación, y cuando solo contaba veintitrés años de edad.

CÓMO «PESAR» EL SOL

La ecuación [1] anterior tiene una importancia vital para nosotros, ya que relaciona la velocidad de un cuerpo en órbita con la masa del objeto que lo tiene atrapado gravitatoriamente. Notemos que en la relación [1] no aparece la masa del cuerpo que está en órbita: la velocidad es la misma, se trate de un cuerpo

FIG.2



Un cuerpo que siga una trayectoria circular con velocidad v, como la bola atada a un cordel de la figura, experimenta una aceleración, a, llamada aceleración centrípeta, que está dada por la expresión

$$a = \frac{v^2}{r},$$

donde *r* es el radio de giro. Esta fórmula fue obtenida por primera vez por Huygens en 1659, unos años antes de que Newton abordara el problema de la órbita lunar. Posiblemente Newton conocía el resultado de Huygens, aunque él también obtuvo la misma fórmula de forma independiente (y mucho más elegante). A partir de ella, podemos escribir la velocidad del cuerpo como $v = \sqrt{a \cdot r}$. En el caso de un cuerpo en órbita, *a* es la aceleración de la gravedad, $a = G \cdot M / r^2$. Sustituyendo este valor en la raíz cuadrada anterior, deducimos la velocidad de un cuerpo en órbita, $v = \sqrt{G \cdot M / r}$. Esta es la expresión obtenida por Newton, y que obedece la Luna y cualquier objeto en órbita circular alrededor de otro.

de masa grande (como la Luna) o pequeña (como un satélite artificial).

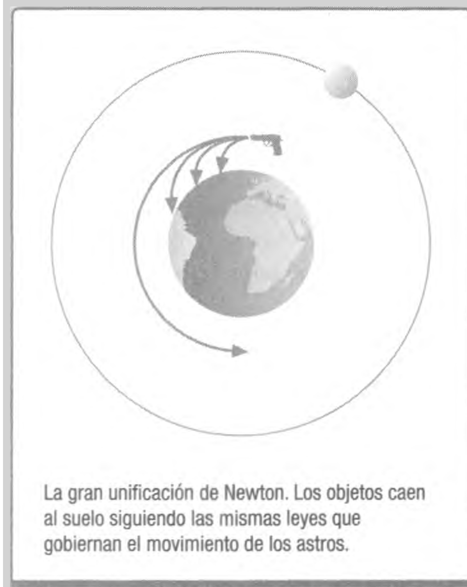
Imaginemos ahora a un ser extraterrestre inteligente, que, con su potente telescopio, observa la Tierra desde su lejano planeta y desea conocer su masa. Para ello no puede utilizar el procedimiento seguido por Newton que expusimos inicialmente, ya que desde su lejanía no puede medir cuál es la aceleración de caída de los cuerpos en la superficie terrestre. Sin embargo, este ser extraterrestre sí que podrá ver la Luna girando alrededor de la

EL JOVEN NEWTON

En 1661, Isaac Newton ingresó en el Trinity College de Cambridge, y recibió el título de Bachelor en 1665, a los veintidós años. No había sido un estudiante brillante, sino más bien introvertido y autodidacta. Sin embargo, en ese momento ya había descubierto una fórmula matemática importante: el teorema del binomio generalizado. En agosto de 1665 se declaró una epidemia de peste y la Universidad de Cambridge fue cerrada temporalmente. Newton regresó a la granja familiar en su pueblecito, Woolsthorpe, donde permaneció ¡a mayor parte del tiempo hasta su regreso a Cambridge, en abril de 1667.

Un bienio milagroso

En ese periodo de dos años escasos, y prácticamente aislado del mundo, el joven Newton, con poco más de veintidós años, realizó algunas de las aportaciones más importantes de la historia de la ciencia. Concretamente, empezó a desarrollar el cálculo diferencial, una nueva y extraordinariamente fértil rama de las matemáticas; estableció las leyes de la mecánica, que fueron la base de esta rama científica hasta la llegada de la relatividad y la mecánica cuántica 250 años después; formuló la ley de gravitación universal y la aplicó a cuerpos celestes como la Luna y los planetas, deduciendo el periodo de rotación de la Luna, y realizó descubrimientos fundamentales sobre la naturaleza de la luz, demostrando experimentalmente que la luz blanca estaba compuesta de luces de colores. No es posible encontrar en la historia de la ciencia un periodo de semejante fecundidad científica, exceptuando el *annus mirabilis* (año de las maravillas) de Einstein (1905). En la misma época se produjo la famosa anécdota de la manzana, que, aunque parezca una leyenda, está bien documentada. En 1666 Newton vio caer una manzana, lo que le condujo a preguntarse por la naturaleza de ¡a fuerza gravitatoria. Dedujo que debía tratarse de una fuerza de largo alcance y que, seguramente, debía afectar también a la Luna, cosa que demostró al poco tiempo. Fue la primera persona en comprender que dos hechos familiares, como la caida de los cuerpos y el movimiento de la Luna, obedecían a la misma causa. Newton siempre fue retraído, competitivo y poco divertido. Sin embargo, era humilde respecto a la trascendencia de sus propios logros, lo cual no impide que suela ser considerado el mayor genio científico de todos los tiempos.



La gran unificación de Newton. Los objetos caen al suelo siguiendo las mismas leyes que gobiernan el movimiento de los astros.

Tierra, y podrá medir su velocidad, *v*, y la distancia de separación Tierra-Luna, *r*. Entonces, usando la ecuación [1], será capaz de deducir el valor de *M* que reproduce correctamente la velocidad lunar: habrá deducido así la masa de la Tierra. Notemos que, para ello, necesitará también conocer el valor de G, pero como se trata de una constante universal, cuyo valor es el mismo en la Tierra o en cualquier otro lugar del universo, su civilización ya lo habrá determinado hace tiempo (gracias a algún «Cavendish extraterrestre»).

De forma exactamente análoga, nosotros podemos determinar la masa de los objetos celestes, simplemente midiendo la velocidad de los cuerpos que orbitan en tomo a ellos, y usando la ecuación [1]. Por ejemplo, podemos determinar la masa del Sol usando la velocidad de traslación de la Tierra en tomo al Sol y la distancia de separación entre ellos. Nuevamente, esto fue llevado a cabo por Newton, que pudo así evaluar cuántas veces es la masa del Sol mayor que la de la Tierra. Su cálculo fue correcto, pero como la distancia Tierra-Sol no estaba todavía bien medida, el valor que obtuvo se quedó algo corto. Hoy sabemos (usando el mismo procedimiento que Newton) que la masa del Sol es unas 333 000 veces la masa de la Tierra. Como veremos enseguida, fue el uso de esa misma relación [1], el que permitió poner de manifiesto la presencia de la enigmática materia oscura.

Merece la pena comentar que el genio de Newton fue aún más allá. Desde la época de Kepler (medio siglo antes) se sabía que los planetas describían realmente órbitas elípticas (una circunferencia es un caso especial de elipse). Newton pudo demostrar que su ley de gravitación universal producía precisamente este tipo de órbitas, y también pudo calcular la velocidad de los planetas al recorrerlas; o sea la generalización de la ecuación [1] para órbitas elípticas. Una vez más, Newton comprobó que las órbitas y las velocidades de los planetas conocidos seguían con disciplina sus predicciones, resolviendo así un problema que había intrigado al mundo durante milenios. En otras palabras, Newton demostró que los planetas se mueven como lo hacen porque sencillamente están cayendo de manera incansable alrededor del Sol. Antes de conseguir esta proeza intelectual, Newton creó una nueva y po-

tentísima rama matemática: el cálculo diferencial (desarrollado de forma contemporánea e independiente por el alemán Gottfried Leibniz). Esta aportación a las matemáticas es tan gigantesca que le sitúan como uno de los grandes matemáticos de todos los tiempos. Aunque parezca increíble, Newton comenzó a desarrollar estas fecundas ideas matemáticas también en los dos mágicos años de 1665 y 1666, si bien fue madurando su trabajo a lo largo de los años siguientes.

En el caso de las órbitas elípticas, la ecuación [1] no se cumple exactamente, ya que, para empezar, la velocidad no es constante. Sin embargo sí que se cumple *en promedio* a lo largo de la órbita. Por tanto, si medimos las velocidades de muchos cuerpos orbitando alrededor de una gran masa, realizando un promedio estadístico podremos seguir usando la ecuación [1] para determinar el valor de esa gran masa, incluso sin saber si las trayectorias de los cuerpos son elípticas o circulares.

CÓMO «PESAR» UNA GALAXIA

El Sol es solo una estrella más entre los centenares de miles de millones que forman nuestra galaxia, la Vía Láctea, que aparece representada en las págs. 26-27. Como muchas otras galaxias, la Vía Láctea tiene la forma de un disco gigantesco, que contiene varios brazos espirales que se enroscan alrededor de un núcleo más denso.

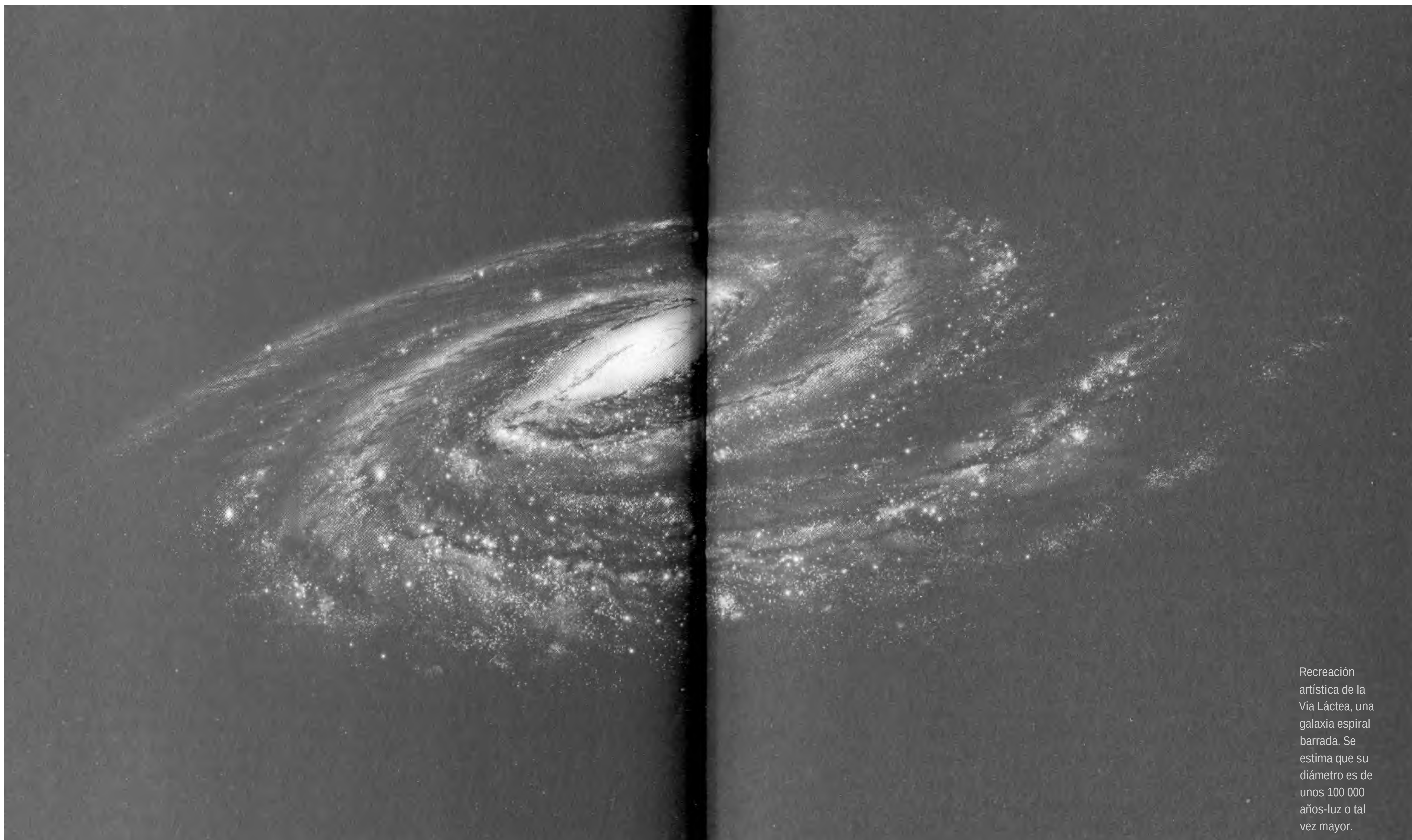
La Vía Láctea tiene grandes cantidades de estrellas, gas y polvo. En uno de los brazos exteriores está situado el Sol, nuestra estrella. El núcleo galáctico tiene forma de «barra» (razón por la que la Vía Láctea se considera actualmente una galaxia del tipo «espiral barrada»). Existen claros indicios de que en el interior del núcleo hay un agujero negro con una masa de más de cuatro millones de veces la masa del Sol.

Es difícil concebir el tamaño de la Vía Láctea. El diámetro del disco es aproximadamente 100000 años-luz. Podemos compararlo con el tamaño de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, que tiene un (gigantesco) diámetro de 300 millones de kilómetros. Si nos imaginamos el círculo descrito por la órbita terrestre como una letra *«o»* tipográfica, entonces la Vía Láctea tiene un tamaño equivalente a África. Según las últimas estimaciones, la Vía Láctea contiene entre 200 000 y 400 000 millones de estrellas. Repartidas entre todos los habitantes de la Tierra, tocaríamos a unas cuarenta por persona. Además, hay un número aún mayor de planetas, muchos orbitando en tomo a las estrellas y muchos vagabundeando por los inmensos espacios interestelares; no obstante, al ser extremadamente más ligeros que las estrellas, su aportación a la masa total de la galaxia es despreciable. Actualmente se conoce la existencia de unos 100 000 millones de galaxias, número parecido al de estrellas dentro de la Vía Láctea.

> La cosa más bella que podemos experimentar es el misterio.
> Es la fuente de toda ciencia
> y arte verdaderos.
>
> Albert Einstein

¿Es posible determinar la masa de la Vía Láctea o cualquier otra galaxia? Sí, naturalmente, usando el mismo procedimiento que utilizó Newton para medir la masa del Sol: estudiando las velocidades de objetos (típicamente estrellas) que orbitan alrededor de la galaxia en cuestión, y utilizando nuestra relación [1] para determinar la masa de la galaxia capaz de producir esas velocidades. Además, considerando las velocidades de estrellas a diferentes distancias del centro galáctico, lo que se determina en realidad es la cantidad de masa rodeada por la órbita de cada estrella, que es la que de forma efectiva la atrae. De este modo se puede descifrar cómo está distribuida la masa de la galaxia. Este fue el trabajo que en los años setenta del siglo xx llevó a cabo la astrónoma Vera Rubin, formando equipo con Kent Ford, ambos estadounidenses.

En principio, esta labor podría parecer algo «sencillo»: medir velocidades de estrellas rotando en tomo a una galaxia y aplicar la ecuación [1] para deducir la masa de dicha galaxia. Pero no lo es tanto: en primer lugar, es difícil seguir estrellas individuales en galaxias distantes (y mucho más en los años setenta). Además, aunque las estrellas se mueven a gran velocidad, la dimensión de su órbita es gigantesca, por lo que parecen estar



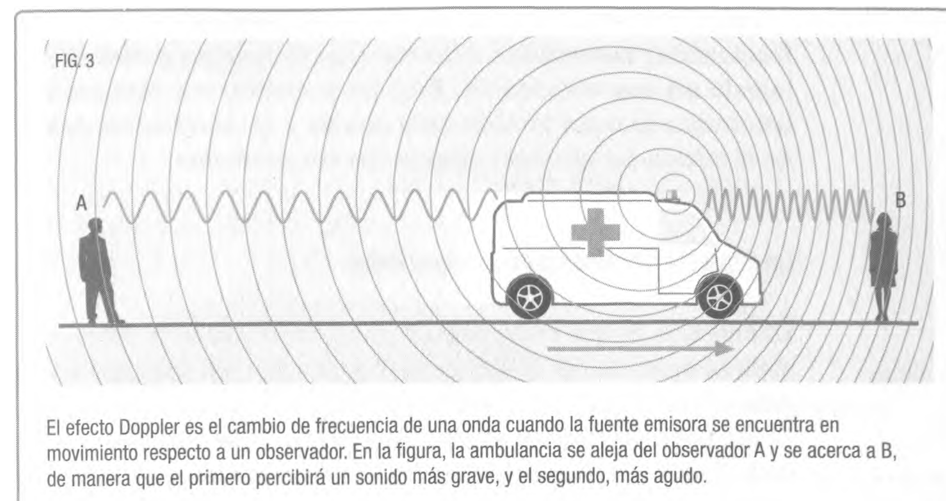
Recreación artística de la Vía Láctea, una galaxia espiral barrada. Se estima que su diámetro es de unos 100 000 años-luz o tal vez mayor.

> La ciencia avanza mejor cuando las observaciones nos obligan a cambiar nuestras ideas preconcebidas.
>
> Vera Rubín

quietas en un punto de la misma. No es posible medir la velocidad de las estrellas en galaxias lejanas siguiendo su movimiento con un telescopio, como se hizo en su día con la Luna y los planetas. Esto lo sabemos por experiencia propia: las posiciones relativas de las estrellas en el cielo *parecen* inmutables. Por ejemplo, la Osa Mayor conserva noche tras noche su forma característica, aunque en realidad sus estrellas se mueven a gran velocidad relativa entre ellas, por lo que la constelación perderá esa forma en unos milenios.

Para superar estas dificultades Rubin y Ford utilizaron la técnica del *efecto Doppler*. Imaginemos a un tenista que nos lanza pelotas desde el fondo de una pista, al ritmo constante de una por segundo. Lógicamente, nosotros las recibiremos también al mismo ritmo de una por segundo, ya que cada pelota tarda el mismo tiempo en llegar a nosotros (imaginamos que todas son lanzadas con la misma velocidad). Supongamos que el tenista comienza a correr hacia nosotros, sin dejar de lanzar pelotas al mismo ritmo. Ahora las recibiremos con una frecuencia mayor de una por segundo, ya que cada nueva pelota, al tener que recorrer una distancia cada vez menor, tardará menos en llegar que la anterior. Cuanto mayor sea la velocidad del tenista, mayor será el aumento de la frecuencia con que recibiremos las pelotas. De hecho, midiendo ese aumento de frecuencia, podríamos deducir la velocidad con que se acerca el tenista, aunque no lo viéramos aproximarse.

Si en vez de lanzamos pelotas, el tenista emite un sonido con un silbato, el fenómeno es el mismo. Las ondas sonoras se parecen a pequeñas compresiones de aire, que se producen con una cierta frecuencia y viajan a velocidad constante, como las pelotas de tenis anteriores. Si el tenista corre hacia nosotros, la frecuencia con que nos llegarán esas pequeñas compresiones de aire aumentará, y por tanto percibiremos que el sonido de su silbato se hace más agudo. Esa es la razón por la que cuando una ambulancia se acerca, el sonido de su sirena suena más agudo, y al alejarse se vuelve más grave (figura 3).



El efecto Doppler es el cambio de frecuencia de una onda cuando la fuente emisora se encuentra en movimiento respecto a un observador. En la figura, la ambulancia se aleja del observador A y se acerca a B, de manera que el primero percibirá un sonido más grave, y el segundo, más agudo.

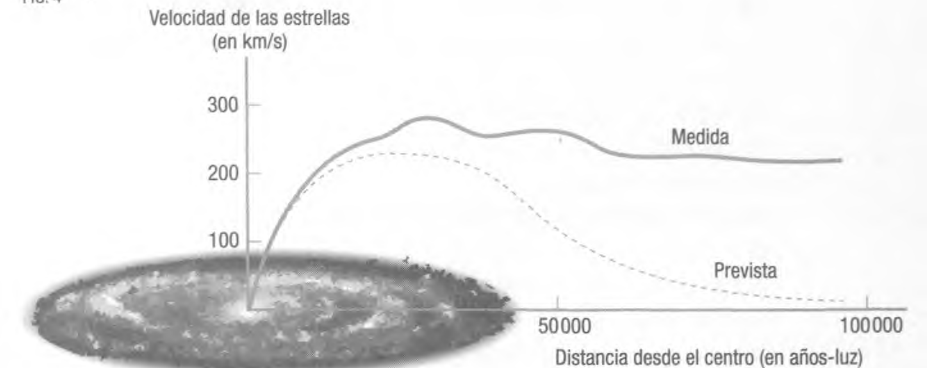
Esta modificación de la frecuencia de una onda, debida a la velocidad del objeto emisor, es el llamado efecto Doppler, y tiene una enorme importancia en astronomía y astrofísica. La luz es también una onda, en este caso una onda electromagnética, en la cual lo que vibran son los campos eléctricos y magnéticos. Para la luz visible, la frecuencia más baja corresponde a la luz roja, y la más alta, a la azul y violeta. Si un objeto emisor de luz, de una cierta frecuencia, se acerca a nosotros, la frecuencia luminosa que mediremos será mayor (la luz se habrá «desplazado al azul») y si se aleja será menor («desplazamiento al rojo»). Por tanto, midiendo el desplazamiento al rojo o al azul de las frecuencias de las ondas luminosas que nos envían las estrellas (o cualquier otro objeto del cielo), podemos deducir su velocidad de acercamiento o alejamiento de nosotros. Para hacer un estudio de este tipo hay que considerar luces con frecuencias conocidas a priori. Concretamente, el hidrógeno y otros elementos presentes en las estrellas poseen líneas de emisión y absorción de luz con frecuencias perfectamente establecidas en el laboratorio. El estudio del desplazamiento hacia el rojo o el azul de esas líneas es el que permite determinar la velocidad de las estrellas emisoras respecto a nosotros.

Rubin y Ford aplicaron esta conocida técnica, de forma perfeccionada y sistemática, a las estrellas de muchas galaxias, evaluando así sus velocidades. Esto les permitió, por primera vez, determinar la masa total de cada galaxia y su distribución dentro de la misma. Lo que encontraron fue sorprendente.

La materia oscura hace su aparición

La cuestión es que existía una *expectativa* razonable sobre cuál sería la masa de las galaxias. Al fin y al cabo, en apariencia una galaxia está constituida principalmente por estrellas que brillan. Como conocemos bien el funcionamiento de las estrellas, es posible hacer una buena estimación de la masa total de estrellas a partir del brillo total de la galaxia. Además, está el gas de la galaxia (fundamentalmente hidrógeno y helio), que puede tener una masa comparable a la de las estrellas. Actualmente conocemos bien la masa contenida en el gas galáctico, gracias al estudio de los rayos X que ese gas emite. Toda esa materia, gas y estrellas, constituye la mayor parte de la masa *ordinaria* de la galaxia, la única conocida en tiempos de Rubin. Por tanto, a priori se creía tener una idea clara de cuál debía ser la masa de las galaxias y cómo estaba distribuida. Concretamente, a una distancia grande del centro, apenas hay ya estrellas y gas que contribuyan a la masa galáctica. Por ello, para las estrellas distantes del centro galáctico, la velocidad debía disminuir *rápidamente* con la distancia.

Para entender mejor esto último, recordemos la ecuación [1] que nos da la velocidad de un cuerpo en órbita, $v = \sqrt{G \cdot M / r}$. Para estrellas distantes, la masa de materia visible rodeada por la órbita de la estrella apenas aumenta al aumentar el radio de la órbita, ya que apenas hay materia visible en la periferia de la galaxia. Por tanto, la masa M que atrae a una estrella distante y a una estrella *aún más* distante es prácticamente la misma. Sin embargo, la distancia r es mucho mayor para la segunda, por lo que su velocidad ha de ser mucho menor. En otras palabras, la velocidad de las estrellas debería ser menor cuanto mayor sea



su lejanía respecto al centro de su galaxia. Pero esto *no* es lo que encontraron Rubin y Ford.

Lo que encontraron fue que la velocidad de las estrellas distantes parecía ser siempre aproximadamente la misma, aunque r fuera muy grande. Esto está reflejado, usando datos actuales y para el caso de la galaxia Andrómeda, la más próxima a la nuestra, en la figura 4. La línea discontinua corresponde a la distribución de velocidades esperada (en km/s) si no hubiera más materia que la visible. Como se puede ver, en zonas alejadas del centro, las velocidades que uno esperaría disminuyen rápidamente con la distancia. La línea continua muestra lo que realmente se mide: las velocidades de las estrellas apenas descienden con la distancia, en flagrante contradicción con lo previsto.

La explicación más sencilla, pero que supone un descubrimiento revolucionario, es que, además de la materia visible, existe otra materia invisible, bautizada como materia oscura, que se extiende mucho más allá de los confines aparentes de la galaxia, y que contiene mucha más masa que la primera. De esta forma, cuanto más distante se encuentre una estrella, mayor es la masa efectiva que la atrae. El aumento de la distancia, r, en el denominador de la ecuación $v = \sqrt{G \cdot M / r}$ se ve así compensado por el aumento de la masa, M, en el numerador, de manera que la

velocidad de la estrella no disminuye con la distancia, tal como nos dicen las observaciones.

Rubin y Ford estudiaron unas sesenta galaxias, encontrando el mismo fenómeno una y otra vez. Generalmente se considera que esta fue la primera evidencia clara y general de la presencia de materia oscura en el universo. Desde luego, fue la primera evidencia tomada en serio por la comunidad científica, lo que situó el estudio de la materia oscura entre las prioridades de la investigación astrofísica.

Las conclusiones del pionero estudio de Rubin y Ford han sido confirmadas posteriormente por muchas observaciones independientes. Típicamente, la masa visible (ordinaria) de una galaxia es del orden del 10% de la misma; el 90% restante es materia oscura. Este es el caso también de nuestra galaxia, la Vía Láctea. De hecho, existen algunas galaxias, normalmente galaxias pequeñas, formadas casi por entero (en un 99%) por materia oscura. A nivel cósmico, sin embargo, la proporción de materia oscura es algo menor: entre un 80% y un 85% de la materia total del universo, siendo el 15-20% restante materia ordinaria. La razón es que la mayor parte de la materia ordinaria del universo no está en las galaxias, sino en el gas intergaláctico que flota entre ellas, constituido fundamentalmente por hidrógeno y helio. Estos números son porcentajes respecto al total de *materia* del universo. Además de esta, tenemos la energía oscura, que es más abundante que las materias oscura y ordinaria juntas, y que será examinada más adelante.

El hallazgo de Rubin y Ford supuso un jalón histórico en el descubrimiento de la materia oscura. Sin embargo, ellos no fueron los primeros en observar indicios de su existencia. Posiblemente, tampoco percibieron al principio toda la trascendencia de lo que estaban encontrando. De alguna forma, el descubrimiento de la materia oscura y de su importancia ha tomado su tiempo, del mismo modo que los europeos necesitaron algún tiempo para percibir la magnitud del descubrimiento de América. Normalmente se considera que el primer astrónomo en proponer el concepto de materia oscura, basado en una evidencia observacional sólida, fue Fritz Zwicky en 1933. Zwicky no estudió galaxias individua-

EXPLORADORA DE GALAXIAS

La astrónoma estadounidense Vera Rubin (n. 1928) se mostró interesada por las estrellas desde niña. En 1948, después de obtener el título de «Bachelor» por la Universidad de Vassar, intentó inscribirse en el programa de astronomía de la prestigiosa Universidad de Princeton. Vergonzosamente, fue rechazada porque dicho programa no aceptaba mujeres (una práctica que se mantendría hasta 1975). Entonces Vera Rubin se inscribió en la Universidad de Cornell, donde tuvo como profesores a físicos de la talla de Richard Feynman y Hans Bethe. Más tarde (en 1954) se doctoró en la Universidad de Georgetown, dirigida por el también gran físico George Gamow, y algunos años después (en 1965) consiguió un puesto en la Institución Carnegie de Washington, donde ha permanecido desde entonces. En aquel mismo año fue la primera mujer autorizada a utilizar el observatorio de Monte Palomar.

El hallazgo de la materia oscura

En los años sesenta, Rubin formó equipo con el astrónomo Kent Ford, que había desarrollado un espectrómetro de alta sensibilidad, para estudiar la dinámica de las estrellas en las galaxias espirales. Los cálculos de Rubin indicaban que el movimiento de las estrellas requería que las galaxias tuvieran mucha más masa de la que se podía observar. Rubin recordó la antigua afirmación de Zwicky en el sentido de que en el universo había una gran cantidad de materia «oscura». Sus resultados confirmaban esta idea. Aunque inicialmente las observaciones de Rubin también fueron recibidas con escepticismo, el trabajo era tan cuidadoso y concluyente que al poco tiempo fueron aceptadas por la comunidad. Como Vera Rubin afirmó: «La ciencia avanza mejor cuando las observaciones nos obligan a cambiar nuestras ideas preconcebidas».



Estudiando el movimiento de las estrellas, Vera Rubin obtuvo las primeras pruebas convincentes de que en las galaxias lo que se ve es solo una pequeña parte de lo que hay. En la fotografía, Rubin estudiando espectros luminosos galácticos en los años setenta.

> En las galaxias espirales la proporción entre la materia oscura y la luminosa es de diez a uno. Posiblemente esta es también la proporción entre nuestra ignorancia y nuestro conocimiento.
>
> Vera Rubín

les, sino el Cúmulo de Coma, formado por unas mil galaxias. De la misma forma que se puede «pesar» una galaxia, se puede pesar un cúmulo de galaxias. Esto es lo que hizo Zwicky, estudiando las velocidades de las galaxias (no de las estrellas individuales) dentro del cúmulo. Al igual que Rubin y Ford cuarenta años después, Zwicky observó que dichas velocidades eran mucho más altas de lo esperado, por lo que debía existir algún tipo de «materia oscura» en el cúmulo.

En realidad, Zwicky sobreestimó el porcentaje de materia oscura en el Cúmulo de Coma, debido a que no consideró el gas intergaláctico presente en el cúmulo, y que de hecho representa la mayor parte de la materia ordinaria en el mismo. No pudo considerarlo porque aún no se disponía de la instrumentación necesaria para poder observarlo. Además Zwicky partió de estimaciones erróneas acerca del ritmo de expansión del universo, un parámetro importante cuando se quieren determinar posiciones de galaxias lejanas. Aun así, acertó en lo esencial. Sin embargo, su trabajo apenas fue tenido en cuenta por la comunidad científica. Los astrónomos y astrofísicos tendieron a pensar que, cuando se dispusiera de mejores datos, los hechos encontrados por Zwicky se podrían explicar de otra manera, sin recurrir a una misteriosa materia oscura.

El caso es que, para desesperación de Zwicky, la investigación en este campo estuvo prácticamente detenida durante casi cuarenta años, hasta el trabajo de Rubin y Ford en los setenta.

Merece la pena señalar que Fritz Zwicky fue un auténtico genio adelantado a su época y poco reconocido en vida, quizá debido en parte a su carácter cáustico con sus colegas. Además de su trabajo pionero en la materia oscura, fue el primer astrofísico en proponer que las supernovas eran explosiones de estrellas, que dejaban tras de sí una estrella de neutrones como remanente. Y también el primero en proponer que los cúmulos de galaxias podían actuar como lentes gravitacionales, un fenómeno interesantísimo que encontraremos en el próximo capítulo y que tardó cuarenta años en ser observado.

En todo caso, hay que decir que, incluso después de Rubin y Ford, no estaba claro si la materia oscura era solo materia ordinaria cuya presencia, por algún motivo, era difícil de detectar, o si realmente se trataba de un tipo de materia nuevo y desconocido. Más adelante aclararemos esta cuestión.

También se especulaba con la posibilidad de que no hubiera materia oscura en absoluto, sino que *a grandes distancias* la ley de Newton fallara y con ella la relación utilizada entre la velocidad de un cuerpo en órbita y la masa que lo atrae. En ese caso, se habría estado utilizando una fórmula incorrecta para deducir la masa de las galaxias, y de ahí la conclusión (que sería errónea) de que dicha masa fuera mucho mayor que la masa visible.

Se tardaron todavía bastantes años en aclarar esta importantísima cuestión: ¿Lo que se observa es materia oscura o son fallos en la ley de Newton?

CAPÍTULO 2

Experimentos cósmicos

La observación del universo nos muestra una gran variedad de situaciones físicas diversas. Algunas de ellas representan auténticos experimentos de magnitud cósmica que la propia naturaleza ha creado y que, analizados inteligentemente, permiten poner a prueba la ley de Newton y el concepto de materia oscura.

En páginas precedentes hemos repasado algunas de las contribuciones más importantes de Newton a la física y las matemáticas. Cuando se piensa en su significación, se comprende que Newton fuera reverenciado en su época y en épocas posteriores como ningún científico lo ha sido. Concretamente, su ley de gravitación universal demostró funcionar con maravillosa precisión en las escalas de distancia más variadas: desde unas bolas de plomo atrayéndose a pocos centímetros, hasta el Sol, planetas, lunas y cometas atrayéndose a distancias de miles de millones de kilómetros.

Sin embargo, en ciencia no hay verdades ni científicos sagrados. Todas las teorías, por robustas que parezcan, están permanentemente sometidas al veredicto de la propia naturaleza: son los experimentos y las observaciones los que han de respaldarlas o rechazarlas, o bien fijar sus límites de aplicabilidad. Esto vale también para un coloso como Newton y su ley de gravitación universal. Ciertamente, esta funciona espléndidamente para la masa del Sol y las distancias típicas entre objetos del sistema solar. Pero la masa de una galaxia es cientos de miles de millones de veces mayor que la del Sol, y las distancias típicas a las

que orbitan las estrellas respecto del centro galáctico son miles de millones de veces mayores que las de una órbita planetaria (recuerden la comparación de una letra «o» con el tamaño de África). Así que ¿es realmente sensato dar por supuesto que la ley de Newton se ha de seguir cumpliendo a esas gigantescas escalas de masa y distancia?

De hecho, como ya se ha mencionado, la idea de algunos científicos fue que la ley de Newton dejaba de funcionar bien a grandes distancias, hipótesis con la que simpatizaba (y simpatiza) la propia Vera Rubin. En el capítulo anterior utilizamos repetidamente la ecuación [1] que relaciona la velocidad de un cuerpo en órbita, v, con la masa que lo atrae, M, y su distancia a la misma, r (recordemos, $v = \sqrt{G \cdot M/r}$). En esta relación se ha supuesto que G es una constante universal, tal como se asume en la ley de Newton. Pero ¿y si no lo fuera? Por ejemplo, para objetos muy alejados de la masa central, el valor de G «podría» aumentar con la propia distancia, r. Concretamente, si a grandes distancias G *fuera* proporcional a r, un aumento de r en el denominador de la expresión anterior quedaría exactamente compensado por el aumento de G en el numerador. De esta forma, para una misma masa de la galaxia, M, la velocidad con la que orbitan las estrellas periféricas sería la misma, independientemente de su distancia al centro galáctico. ¡No haría falta postular ninguna materia oscura para entender las velocidades anómalamente grandes de las estrellas en la periferia de las galaxias!

A las teorías de este tipo, que postulan que, a grandes distancias, la atracción gravitatoria difiere de la predicha por la ley de Newton, produciendo un efecto que parece debido a una materia oscura, se les ha llamando teorías MOND, acrónimo inglés de *Modified Newtonian Dynamics* («dinámica newtoniana modificada»).

Hay que decir que el descubrimiento de fallos en la ley de Newton supondría un descubrimiento todavía más importante que el de la propia materia oscura, de manera que la hipótesis MOND es cualquier cosa menos conservadora. Pero ¿puede ser cierta?

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Es hora de aclarar un hecho que posiblemente el lector ya conozca: en realidad, la venerable ley de gravitación universal de Newton *no* siempre es correcta. Hoy conocemos bien sus limitaciones gracias al trabajo realizado hace cien años por Albert Einstein, posiblemente el único físico de la historia que puede codearse con Newton por su genialidad y sus extraordinarias contribuciones. En 1915 Einstein era ya un físico mundialmente reconocido por su teoría de la relatividad especial y otras aportaciones que habían revolucionado la física. Pero su máxima contribución, la teoría de la relatividad general, culminó en aquel 1915 tras ocho años de intenso trabajo. La relatividad general es una teoría que describe la forma en la que un mismo fenómeno es contemplado por observadores diferentes, sea cual sea la posición, velocidad o aceleración de estos. En ese sentido supone una extensión de la relatividad especial, formulada por Einstein en 1905, y que se refería solo a observadores con velocidad constante. La teoría de la relatividad (especial y luego general) supuso una revolución científica de primer orden, que trastocó profundamente conceptos familiares que parecían intocables. Concretamente, la nueva teoría implicaba que las nociones de espacio y tiempo no son como parece decimos nuestra intuición, es decir magnitudes inertes e inmutables. El espacio-tiempo como un todo se puede estirar y encoger, curvar y retorcer. Su textura se parece más a la de la goma que a la del cristal.

Pero, además, la relatividad general es una teoría de la gravitación. El punto importante es que, según ella, el espacio-tiempo se curva debido a la presencia de masa y energía. Si no se curvara, cualquier objeto abandonado a sí mismo mantendría su estado de movimiento de forma indefinida: si estaba inicialmente en reposo, permanecería en reposo, y si no, seguiría moviéndose en línea recta con velocidad constante. Esto es exactamente lo que les sucede a los objetos aislados de todo tipo de fuerzas e influencias, algo que ya comprendió Galileo en el siglo xvii. Sin embargo, de acuerdo con la relatividad general, en las cercanías de una gran masa el espacio-tiempo se curva. Un objeto abando-

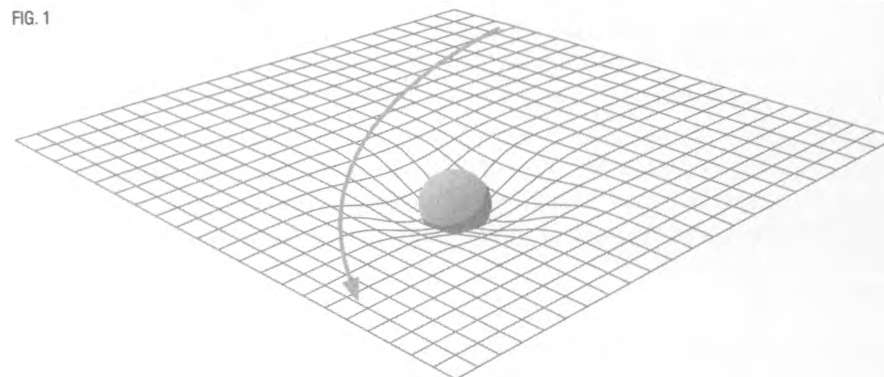
nado a sí mismo, al aproximarse a esa gran masa, entra en una zona de espacio-tiempo curvado y su trayectoria se altera, acelerándose y torciéndose, tal como está representado en la figura 1. La aceleración experimentada por el objeto es la que atribuimos al efecto de una fuerza, bautizada como «fuerza de gravedad», pero en realidad es una consecuencia de que el espacio-tiempo está curvado. Podemos decir que, según la relatividad general, las masas cambian la geometría del espacio-tiempo, curvándolo. Y este cambio de geometría es el que dicta a los objetos cómo se tienen que mover, provocando la sensación de que hay una fuerza que los dirige: la fuerza gravitatoria.

Por supuesto, estos conceptos son terriblemente antintuitivos. Además, la figura 1 capta la esencia de lo que sucede, pero no es completa. En la figura es solo el espacio el que está curvado en las inmediaciones de la gran masa, pero en la formulación completa de la teoría es el espacio-tiempo como un todo el que se curva, un concepto imposible de visualizar, pero que matemáticamente se puede formular de manera precisa.

Hasta ahora hemos hecho una descripción cualitativa de cómo surgen las fuerzas gravitatorias a partir de la geometría del espacio-tiempo. Podemos ir un poco más lejos. Einstein propuso la forma exacta en la que la masa y la energía curvan el espacio-tiempo. La ecuación que describe este fenómeno es la ecuación principal de la relatividad general, una de las más profundas que se hayan escrito jamás:

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} R = T^{\mu\nu}. \quad [2]$$

No pretendemos explicar con precisión la definición de los símbolos de esta fórmula (que por simplicidad han sido escritos en ciertas unidades convenientes); solo acercarnos al significado de la misma. En el miembro de la izquierda encontramos dos símbolos, $R^{\mu\nu}$ y $g^{\mu\nu}$, que son, respectivamente, la *curvatura* y la *métrica* del espacio-tiempo. Sin entrar en tecnicismos, estas variables describen la geometría del espacio-tiempo, cómo está de curvado en



Un objeto masivo distorsiona la geometría del espacio-tiempo a su alrededor, provocando un cambio de trayectoria en los objetos que se encuentran dentro de su radio de acción. El efecto es como si una fuerza misteriosa los dirigiese: la fuerza de la gravedad.

cada punto. Esa geometría es la que determinará las trayectorias de los objetos. En el miembro de la derecha encontramos otro símbolo, $T^{\mu\nu}$, el llamado *tensor energía-momento*. Nuevamente sin entrar en tecnicismos, esta variable representa la cantidad de materia y energía que hay en el universo. Por tanto la ecuación anterior dicta la forma precisa en la que la materia y la energía (representadas por $T^{\mu\nu}$) producen curvatura en el espacio-tiempo (codificada en $R^{\mu\nu}$ y $g^{\mu\nu}$). La ecuación [2] se puede aplicar en el caso de que la materia sea una gran masa central, M. Entonces, la ecuación nos dicta cómo el espacio-tiempo se curva alrededor de ella, es decir el efecto que se ha ilustrado en la figura 1. Tal como hemos dicho, esa curvatura es a su vez la causante de que los objetos cambien sus trayectorias cuando se acercan a la masa, exactamente como si sufrieran una fuerza gravitatoria newtoniana. Bueno..., en realidad no «exactamente». Lo que se deduce de la ecuación [2] es que la fuerza gravitatoria efectiva es muy parecida a la famosa ley de gravitación universal de Newton, pero con pequeñas modificaciones:

$$F = G\frac{M \cdot m}{r^2} + f. \quad [3]$$

Como se puede ver, la fuerza es idéntica a la postulada por Newton, más una pequeña corrección que hemos llamado f y que representa la contribución relativista a la fuerza gravitatoria. Realmente f es una suma de términos que, a su vez, dependen, en una forma complicada, de la distancia r e incluso de las velocidades de las dos masas que se atraen. No escribiremos aquí la forma completa de f ya que es engorrosa, pero para los lectores curiosos reproduciremos el más importante de esos términos:

$$f = -\frac{4}{c^2} \cdot \frac{G^2 \cdot M^2 \cdot m}{r^3} + \cdots \qquad [4]$$

Aquí *c* es la velocidad de la luz (un parámetro omnipresente en las ecuaciones relativistas). Como se puede ver, se trata de una contribución negativa; por tanto la fuerza gravitatoria real es más pequeña que la predicha por Newton. El valor de f suele ser diminuto, pero siempre está ahí, y modifica sutilmente las trayectorias de los objetos que sufren atracción gravitatoria.

Un punto importante es que f no disminuye con el cuadrado de la distancia, como en la ley de Newton, sino con el cubo de la misma, tal como nos indica la r^3 en el denominador. ¿Por qué es tan importante esto? En realidad, Newton era consciente de que tal vez su ley de gravitación no era exacta, y anticipó un método inteligente para ponerla a prueba. Concretamente, una de las consecuencias de la ley de gravitación newtoniana es que las órbitas de los planetas debían ser elipses cerradas, tal como, en efecto, parecen ser en la práctica. Sin embargo, si la fuerza de atracción no es *exactamente* inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, sino que tiene pequeñas correcciones, entonces las órbitas dejan de ser cerradas y estables: van cambiando con el tiempo. Newton propuso hacer un seguimiento de las órbitas de los planetas, para detectar cualquier posible desviación de su forma elíptica estable, lo que hubiera supuesto una señal de que su celebrada ley necesitaba modificaciones. Y esto es lo que se hizo a lo largo del tiempo, encontrándose que los

EL JOVEN EINSTEIN

A comienzos de 1905 Albert Einstein era un joven a punto de cumplir veintiséis años sin especial brillo. Había terminado sus estudios de física en la Escuela Politécnica de Zúrich en 1900, donde intentó, sin éxito, permanecer como profesor contratado. En 1902 consiguió un empleo en la Oficina de Patentes de Berna, que le proporcionó seguridad económica, pero le distanció del mundo académico. Sin embargo, en 1905, desde aquella oscura oficina, Einstein publicó una serie de artículos que iban a revolucionar la física y que, por sí solos, bastarían para situarle entre los más grandes científicos de la historia. En el primer artículo explicó el efecto fotoeléctrico, trabajo por el que recibiría el premio Nobel en 1921, y que fue esencial para establecer las bases de la mecánica cuántica, uno de los dos pilares básicos de la física moderna. En el segundo artículo Einstein explicó matemáticamente el movimiento browniano, lo que proporcionó pruebas convincentes de la existencia real de átomos y moléculas.

Una revolución conceptual

En los dos artículos siguientes Einstein estableció las bases de la teoría de la relatividad especial, que vendría a sustituir las leyes de la mecánica establecidas por Newton (y en parte por Galileo) en el siglo xvii. El primero de estos artículos revolucionó los conceptos de espacio y tiempo, que dejaron de ser concebidos como inertes, inmutables y desconectados entre sí. En el segundo formuló por primera vez su famosa ecuación $E=mc^2$, que establece la equivalencia entre los conceptos de masa y energía. La relatividad especial fue generalizada años más tarde por el propio Einstein, con su teoría de la relatividad general, constituyéndose en el segundo pilar conceptual de la física moderna.

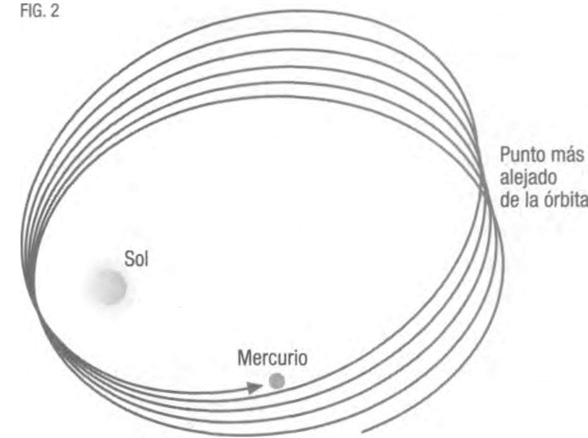
Por ello, 1905 ha sido denominado el *annus mirabais* de Einstein. No hay en la historia de la ciencia un año que pueda comparársele, excepto el periodo 1665-1666 de Isaac Newton. De hecho, hay algunas curiosas similitudes entre ambos: tanto Einstein como Newton eran jóvenes (veintiséis y veintitrés años respectivamente), que no habían brillado especialmente hasta ese momento, y que se encontraban en lugares alejados del mundo académico (una oficina de patentes y un pueblecito aislado). ¿Meras coincidencias?



Einstein en 1904, justo un año antes de su *annus mirabilis*.

planetas permanecían obedientemente en órbitas cerradas... excepto por una pequeña anomalía. Concretamente, a comienzos del siglo xx era bien sabido que la órbita de Mercurio presentaba una extraña *precesión*: el punto más alejado de la órbita se iba desplazando ligerísimamente a cada nueva vuelta del planeta, tal como muestra la figura 2. Esta precesión se debía en parte al efecto de la atracción gravitatoria ejercida sobre Mercurio por otros planetas. Pero, incluso teniendo en cuenta ese efecto, seguía existiendo un minúsculo, pero inquietante, desacuerdo con las predicciones de la gravitación newtoniana. El efecto es muy pequeño y está exagerado en la figura. Si imaginamos Mercurio como un cronómetro que se retrasa un poco a cada nueva vuelta, el retraso misterioso sería solo de la milésima parte de una vuelta por cada 750 000: cuantitativamente insignificante, pero de una importancia teórica crucial.

Es interesante mencionar que el matemático francés Le Verrier intentó, en 1859, explicar la anomalía de la órbita de Mercurio postulando la existencia de un nuevo planeta, más cercano al Sol que Mercurio, y al que bautizó con el nombre de Vulcano. La atracción gravitatoria de Vulcano sobre Mercurio sería, según Le Verrier, la responsable de la enigmática precesión de este último. Notemos que Le Verrier estaba en cierto modo proponiendo la presencia de «materia oscura» (el planeta Vulcano) como la responsable de la trayectoria anómala de Mercurio, una suposición realmente más conservadora que aceptar que la ley de Newton fallaba para Mercurio. El matemático francés estaba razonando de la misma forma que había hecho veinte años antes para entender las anomalías en la órbita de Urano, que también parecía desobedecer la ley de Newton. Le Verrier conjeturó entonces la existencia de un planeta aún no descubierto, Neptuno, como responsable de las mismas, acertando de pleno. Sin embargo, en este caso resultó no haber ninguna «materia oscura», ningún planeta Vulcano. La causa de la enigmática precesión de Mercurio era la pequeña corrección relativista, f , a la fuerza gravitatoria newtoniana. Esto pudo verificarlo el propio Einstein con todo detalle en 1915, y supuso una de las comprobaciones más espectaculares de su teoría.



La teoría de la relatividad general conlleva pequeñas correcciones a la ley de gravitación universal de Newton. Dichas modificaciones hacen que la fuerza de atracción gravitatoria no sea exactamente inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Como consecuencia, las órbitas de los planetas no son elipses cerradas y estables, sino que «preceden» lentamente. Mercurio fue el primer planeta en el que se observó este fenómeno.

¿Por qué era Mercurio el único planeta que «desobedecía» a Newton? La razón está en la forma de la corrección relativista f, tal como la hemos escrito en la ecuación [4]. Al ser inversamente proporcional al cubo de la distancia, r^3, el valor de f es relativamente más importante cuanto menor sea esa distancia; por tanto, es más fácil detectar desviaciones a la ley de Newton en los planetas más cercanos al Sol, y Mercurio es el más cercano. Actualmente, la precesión relativista ha sido también medida en otros planetas (incluyendo la Tierra), y se ajusta en todos los casos a la predicción relativista de forma exquisita.

Aquí enlazamos con el problema que enunciábamos al comienzo de este capítulo. Del mismo modo que la órbita anómala de Mercurio no se debía a ninguna materia oscura, sino a un fallo de la ley de Newton para planetas cercanos al Sol, ¿no podría ser que la ley de Newton fallara también para estrellas muy lejanas que orbitan alrededor de una galaxia?

Lo primero que hay que aclarar es que en ningún caso la corrección relativista a la ley de Newton, que acabamos de describir, puede ser la responsable del extraño movimiento de esas estrellas periféricas. La razón para ello está nuevamente en la forma de la corrección f, tal como está escrita en la ecuación [4], Cuanto

más grande sea r, más insignificante es dicha corrección. Dado que las estrellas describen órbitas de radio gigantesco, los efectos relativistas son absolutamente despreciables. Para ellas, las predicciones de Newton y Einstein son totalmente equivalentes.

Bien, tal vez las predicciones de Einstein tampoco sean perfectas, y a esas distancias gigantescas la fuerza gravitatoria real sea distinta de la dictada por sus ecuaciones (y las de Newton), provocando un efecto que *parece* producido por materia oscura; igual que las anomalías de la órbita de Mercurio parecían el efecto de un misterioso, y al final inexistente, planeta Vulcano. Recordemos que esta era la hipótesis MOND. Muchos físicos han jugado con esta idea, pero actualmente hay evidencias abrumadoras de que este no puede ser el caso. Precisamente, la propia teoría de la relatividad da lugar a un efecto que ha resultado esencial para establecer esas evidencias, como enseguida veremos.

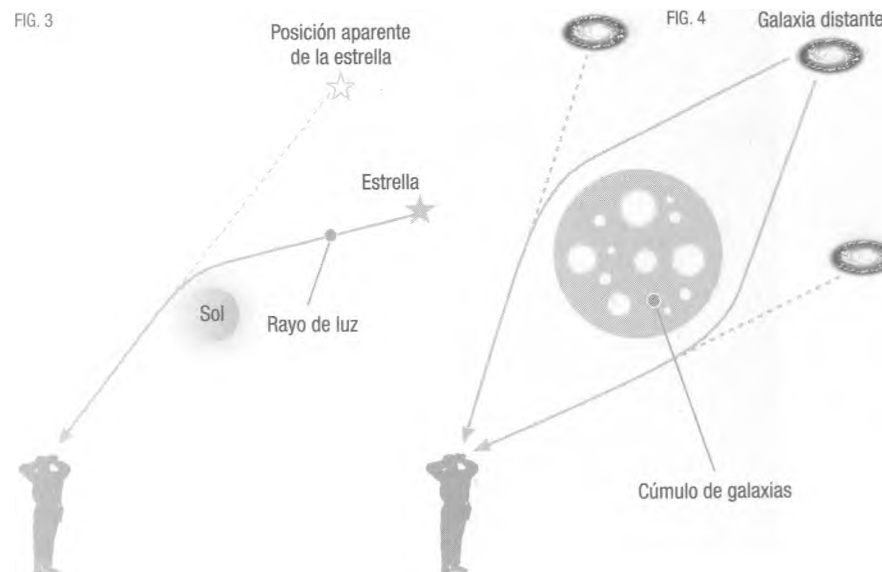
LENTES GRAVITACIONALES

La curvatura del espacio-tiempo en las proximidades de una gran masa no solo hace que los objetos que se acercan a la misma tuerzan sus trayectorias, sino que los propios rayos de luz se tuercen de forma análoga. Por ejemplo, los rayos de luz procedentes de una estrella se curvan cuando pasan cerca del Sol. Esto provoca que la posición aparente de esa estrella, vista desde un observador en la Tierra, aparezca desplazada cuando el Sol se interpone entre ambos (figura 3).

Esta predicción extraordinaria de la relatividad general fue comprobada en 1919 por el físico británico sir Arthur Eddington. Naturalmente, la gran luminosidad del Sol hace imposible observar estrellas en las inmediaciones de la corona solar. Sin embargo, sí es posible observarlas durante un eclipse de Sol total. Eddington aprovechó un eclipse de este tipo que, en aquel 1919, fue visible en una estrecha franja que atravesaba América del Sur y Africa, adonde se desplazaron sendas expediciones científicas lideradas por él. Las fotos tomadas, antes y después del eclipse, demostraron con rotundidad que la posición aparente

de las estrellas se desplazaba durante el eclipse. Aún más importante: el desplazamiento observado coincidía con el predicho por la relatividad general de Einstein. Esta observación crucial supuso un respaldo decisivo para la teoría. Además provocó que Albert Einstein, cuyo prestigio ya era inmenso en la comunidad científica, se convirtiera en una celebridad mundial, como pocos científicos lo han sido. El fenómeno, conocido como *deflexión de la luz* producida por el Sol, ha sido observado una y otra vez con precisión cada vez mayor, siempre ajustándose a las predicciones de la relatividad general.

La deflexión de la luz predicha por la teoría de la relatividad está tan comprobada que puede usarse como un procedimiento alternativo para determinar la masa de un objeto celeste. En el capítulo anterior describimos el procedimiento ideado por New-

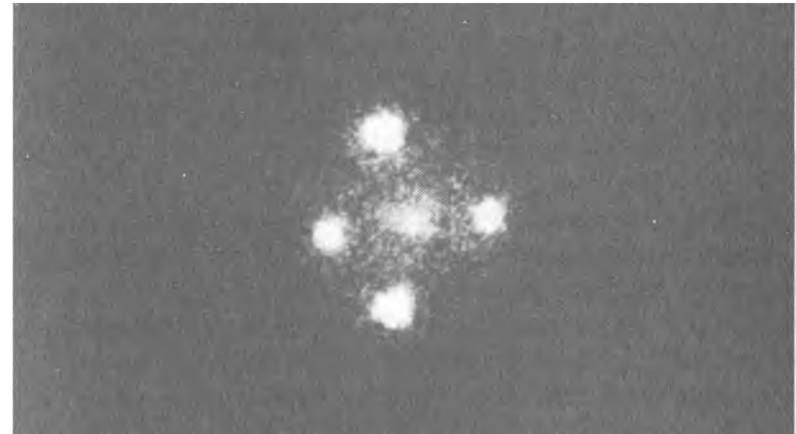
Un objeto masivo como el Sol curva la trayectoria de la luz procedente de una estrella, de manera que su posición aparente difiere de la que ocupa en realidad. En la figura de la derecha, el objeto masivo es un cúmulo galáctico, y el observador recibe la luz de una galaxia distante en más de una dirección, motivo por el que ve imágenes múltiples. El efecto se conoce como «lente gravitacional».

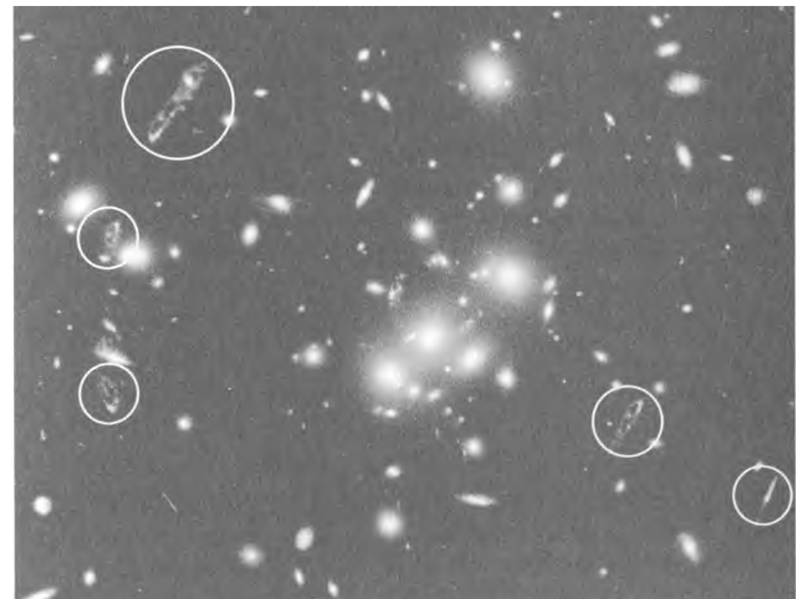
ton para evaluar la masa de cualquier objeto celeste masivo: medir la velocidad de los cuerpos que orbitan en tomo a él. Vimos que de esta forma se pueden calcular las masas de planetas, estrellas, galaxias, etc. Así pudo demostrar Vera Rubin por primera vez que en las galaxias hay mucha más masa de la que parece. Pues bien, como acabamos de ver, los objetos masivos curvan los rayos de luz en su entorno. Midiendo *cuánto* los curvan, y aplicando las ecuaciones de la relatividad general, se puede deducir la masa del objeto en cuestión. El procedimiento es más eficiente cuanto mayor sea su masa, ya que la deflexión producida en los rayos de luz es más acusada.

En general, a los objetos celestes capaces de producir una deflexión perceptible de la luz se les llama *lentes gravitacionales*. Realmente todos los objetos son lentes gravitacionales (incluso un modesto meteorito), pero el efecto que producen es mucho más visible cuando se trata de objetos muy masivos como las estrellas y, especialmente, las galaxias y los cúmulos de galaxias. Si el objeto en cuestión está suficientemente lejos de la Tierra, es posible que produzca imágenes dobles o múltiples de los cuerpos situados a gran distancia, justo detrás de él. Esto está ilustrado en la figura 4, en la que el objeto masivo es un cúmulo de galaxias y el objeto distante situado detrás de él es una galaxia.

En la figura se observa que los rayos de luz provenientes de la galaxia distante se curvan al pasar por la zona del cúmulo de galaxias, de forma que el observador terrestre recibe luz de la galaxia en dos direcciones distintas; por tanto la ve duplicada en dos posiciones diferentes del cielo. El efecto recuerda al que produciría una lupa o una esfera de cristal colosales, de ahí el nombre de «lente gravitacional».

En la fotografía superior de la página siguiente vemos un ejemplo espectacular de este fenómeno, donde el papel de lente gravitacional está jugado por una galaxia, concretamente la PGC 69457. En su interior se puede distinguir un punto brillante, que corresponde al núcleo galáctico, rodeado por otros cuatro puntos brillantes. En realidad, los cuatro puntos son cuatro imágenes de un mismo objeto: un quásar muy lejano situado justo detrás del núcleo de la galaxia. (Los quásares son núcleos galácticos muy





Las fotografías muestran dos casos de lente gravitacional, fenómeno que da lugar a formaciones tan curiosas como la llamada «Cruz de Einstein» (arriba), compuesta por una galaxia central y cuatro imágenes de un mismo quásar situado a gran distancia detrás de ella. La fotografía inferior muestra el cúmulo de galaxias 0024+1654 y las imágenes múltiples que produce (rodeadas por círculos para mayor claridad) de una galaxia muy distante situada detrás de él. El efecto óptico recuerda al que produciría una gran bola de cristal.

> No hay oscuridad sino ignorancia.
>
> William Shakespeare

activos y brillantes, que probablemente encierran agujeros negros.) Los rayos de luz provenientes del quásar se curvan al pasar cerca del núcleo de la galaxia y llegan a la Tierra con diferentes inclinaciones, por lo que vemos una imagen múltiple, a la que se ha llamado «Cruz de Einstein», en honor al autor de la relatividad general.

La fotografía inferior de la página anterior muestra otro ejemplo interesante. En este caso la lente gravitacional es el cúmulo galáctico 0024+1654. Todas las galaxias de la fotografía son miembros de ese cúmulo. Además vemos unas pequeñas manchas alargadas (azuladas en la imagen original) en diferentes lugares, y que hemos rodeado con círculos para mayor claridad. En realidad se trata de imágenes múltiples y distorsionadas de un mismo objeto: una galaxia muy lejana situada justo detrás del cúmulo. En este caso el efecto se parece mucho al que produciría una gran bola de cristal.

El punto importante para nosotros es que, examinando estas bellas imágenes, y aplicando las ecuaciones de la relatividad general, se puede deducir la cantidad de materia causante del efecto de lente gravitacional y cómo está distribuida en el espacio. Por un lado, esto nos permite comprobar que las estimaciones de la masa en cuestión, realizadas «al viejo estilo», o sea a partir de las velocidades de los objetos que orbitan a su alrededor, son correctas. Por otro lado, el efecto de lente gravitacional nos permite medir la distribución de la masa incluso en regiones donde no hay ningún objeto orbitando. Todo lo que nos hace falta es medir de qué modo la luz de objetos lejanos se curva y distorsiona al pasar cerca de la gran masa. Se trata, por tanto, de un método alternativo, elegante y poderoso para determinar la cantidad *total* de materia en una galaxia o un cúmulo de galaxias, y su distribución. Comparando esa determinación con la cantidad de materia ordinaria (visible) presente, podemos deducir la materia «que falta» para completar el total, y que ha de corresponder con la materia oscura (invisible).

El método de las lentes gravitacionales ha permitido, en efecto, comprobar que la materia oscura del universo es cinco o

seis veces más abundante que la materia ordinaria, en perfecto acuerdo con las estimaciones hechas con el método de las órbitas. Pero además, como anunciábamos anteriormente, ha proporcionado una evidencia impresionante de que la materia oscura está realmente ahí, no es una «ilusión óptica» debida a que, a grandes distancias, la atracción gravitatoria funcione de forma extraña (la hipótesis MOND). Veamos cómo se ha obtenido esa evidencia.

UN EXPERIMENTO CON GALAXIAS

Los cúmulos galácticos son estructuras colosales formadas por cientos o miles de galaxias que se mantienen ligadas por la fuerza de la gravedad. En realidad, las galaxias solo constituyen una parte pequeña de la materia ordinaria del cúmulo. La mayor parte se encuentra en forma de gas (principalmente hidrógeno y helio), que se extiende por los espacios intergalácticos. Este gas está normalmente muy caliente, a temperaturas del orden de 100 millones de grados, debido a la alta velocidad de las moléculas, provocada por la propia dinámica gravitatoria. Conviene mencionar, sin embargo, que un explorador que viajara por estos inmensos espacios intergalácticos no apreciaría esas temperaturas, ya que el gas está extremadamente diluido. De hecho, a ese explorador le costaría apreciar la existencia del gas, a menos que transportara instrumentos de observación sofisticados, y lo que sí notaría es un frío glacial. Como decimos, la presencia de este gas es importante, ya que contiene mucha más materia (insistimos, materia ordinaria) que las propias galaxias, del orden de 15 veces más masa. Este gas puede ser observado gracias a la emisión de rayos X que produce (precisamente debido a su alta temperatura). Esta emisión permite determinar tanto su temperatura como su abundancia, y de ahí su masa total.

Pero, además de toda esta materia ordinaria se encuentra la materia oscura, que contiene unas cinco o seis veces más masa que la materia ordinaria, y es, por tanto, la mayor contribuyente a la masa total del cúmulo. Su abundancia puede ser determina-

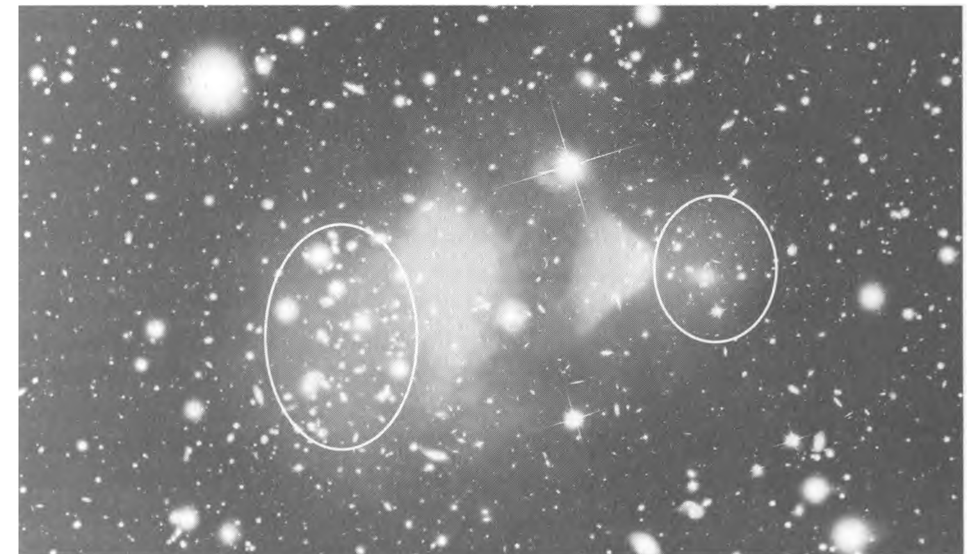
da por los métodos que hemos discutido anteriormente; por ejemplo estudiando el efecto de lente gravitacional que produce. Tengamos presente la jerarquía de masa dentro de un cúmulo galáctico: la mayor parte es materia oscura; el resto es materia ordinaria, principalmente gas intergaláctico, y, en mucha menos cantidad, galaxias individuales. Estas últimas representan del orden del 1 % de la masa total de un cúmulo.

Recordemos ahora las teorías MOND, que sostienen que la materia oscura no existe, sino que es un efecto óptico producido por la extraña forma en que, supuestamente, la fuerza gravitatoria se comporta a grandes distancias. Si esto fuera así, en un cúmulo galáctico la mayor parte de la masa total correspondería al gas intergaláctico. Y este sería, por tanto, el máximo responsable del efecto de lente gravitacional que exhiben los cúmulos. Por supuesto, si aplicamos estrictamente las ecuaciones de la relatividad general, la masa contenida en el gas no es capaz de producir por sí sola el potente efecto de lente gravitacional que muestra un cúmulo, de donde se deduce precisamente que ha de haber mucha más masa en forma de materia oscura. Pero justamente las teorías MOND afirman que la relatividad general (en su forma más simple y pura) no funciona bien a las grandes escalas de un cúmulo, por lo que el gas intergaláctico podría ser capaz por sí solo de producir todo el efecto de lente gravitacional observado, una vez que las ecuaciones de la relatividad general fueran convenientemente corregidas.

¿Cómo podríamos demostrar que la hipótesis MOND es incorrecta? Una forma sería despojar al cúmulo de su gas intergaláctico, y comprobar si sigue exhibiendo el mismo efecto de lente gravitacional. Esto sería una prueba prácticamente irrefutable de que ese efecto no está causado por el gas, sino por otro tipo de materia, mucho más abundante, que permanece en el cúmulo. Y esta sería naturalmente la materia oscura. Pero... ¿como es posible despojar a un colosal cúmulo galáctico de su gas? Bien, esa titánica tarea puede ser realizada por otro cúmulo que choque con él, como vamos a ver.

La fotografía de la página siguiente muestra el llamado *Cúmulo Bala*, que son en realidad dos cúmulos galácticos en coli-





El Cúmulo Bala recibe este nombre por el aspecto que adopta una de las dos nubes de gas, pertenecientes en realidad a dos cúmulos en colisión. Como se aprecia en las imágenes, las nubes de gas (manchas centrales) se han separado de las galaxias individuales y la materia oscura (manchas laterales rodeadas con óvalos blancos).

sión. Se trata de una colisión gigantesca, no solo en escalas de distancia, sino también de tiempo. Pensemos que los dos cúmulos llevan cientos de millones de años chocando, y sus centros ya se atravesaron hace unos 150 millones de años; actualmente se están alejando uno de otro.

En la fotografía se aprecian dos manchas centrales. Esas manchas son las nubes de gas intergaláctico de los dos cúmulos, captadas por el observatorio de rayos X de la NASA, *Chandra*, en 2004. Su tono gris (rosa en la imagen original) está generado artificialmente para que resulten visibles en la imagen. Ambas nubes se están alejando, cada una hacia un lado. Además de las nubes de gas, están las galaxias individuales. Lo extraordinario es que estas últimas no se encuentran en el mismo sitio que las primeras, sino desplazadas, concretamente están más alejadas del centro de la figura que las propias nubes. Esto se percibe especialmente en el cúmulo de la izquierda: un grupo de galaxias (puntos o manchitas de color claro brillante) apiñadas a la izquierda de la nube. Algo parecido pasa en el cúmulo de la derecha. ¿Por qué no están las galaxias en el mismo sitio que las nubes de gas? La razón es que, al atravesarse, las dos nubes de gas friccionan entre ellas, frenándose. Sin embargo, las galaxias están tan alejadas unas de otras dentro de cada cúmulo, que los dos enjambres galácticos se atraviesan casi sin tocarse, por lo que no frenan su movimiento. Por eso están más adelantadas que las nubes de gas. ¡La colisión ha conseguido el efecto excepcional de separar las galaxias de las nubes de gas en cada cúmulo! Además, la observación de la emisión de rayos X permite comprobar que, efectivamente, la materia contenida en el gas es mucho más abundante que la de las galaxias individuales, como es habitual. También nos da otro dato interesante: la temperatura de las nubes de gas es mucho mayor de la acostumbrada, ya de por sí altísima. Ello se debe a la fricción provocada por el choque. Esa fricción es también la causante de la curiosa forma de bala que presenta la nube de la derecha, de ahí el nombre de la estructura.

Así que el Cúmulo Bala ofrece exactamente la situación que deseábamos: dos cúmulos galácticos cuyas nubes de gas se han separado de sus galaxias. Ahora hay que considerar cuál es el efecto de lente gravitacional producido por los cúmulos. Dicho estudio fue llevado a cabo a partir de las imágenes del Cúmulo Bala captadas por el telescopio Hubble, el telescopio europeo del hemisferio Sur y el telescopio de Magallanes. El resultado está mostrado en la fotografía inferior de la pág. 55.

> No importa lo bonita que sea tu teoría. No importa lo listo que seas. Si no está de acuerdo con el experimento, está equivocada.
>
> Richard Feynman

Las manchas claras sobreimpuestas a los lados (azuladas en la imagen original), y rodeadas por óvalos, representan las zonas donde el efecto de lente gravitacional es mayor, y por tanto donde se encuentra la mayor parte de la materia. Como se puede ver, estas manchas están en la misma zona que las galaxias, y separadas de las nubes de gas. Por tanto, la mayor parte de la materia de los cúmulos *no* está en las nubes de gas. En consecuencia, la hipótesis MOND no es sostenible, ya que, si no hubiera materia oscura, las manchas claras deberían haber aparecido en el mismo sitio que las nubes de gas, ya que es allí donde hay más masa ordinaria. Este estudio extraordinario fue presentado en 2006.

En la actualidad, se considera que el Cúmulo Bala es posiblemente la prueba más impresionante y directa de la existencia de la materia oscura. Además nos da pistas adicionales sobre su naturaleza. Concretamente, la materia oscura no solo interacciona muy poco con la materia ordinaria (de ahí su invisibilidad), sino muy poco con ella misma. De lo contrario, las nubes de materia oscura también habrían friccionado entre sí al atravesarse, como las de gas, y se habrían quedado retrasadas. Hay que decir que, posteriormente al Cúmulo Bala, se han analizado otros choques de cúmulos galácticos (como el MACS J0025.4-1222), que exhiben también una separación entre las nubes de gas y la materia oscura, parecida al Cúmulo Bala.

El Cúmulo Bala y otros parecidos son una prueba contundente contra las teorías MOND, pero de hecho hay más evidencias. Por ejemplo, como se mencionó en el capítulo anterior, el porcentaje de materia oscura de las galaxias varía de unas a otras, y

existen incluso galaxias enanas con un porcentaje de materia oscura elevadísimo, de hasta un 99%. Es difícil imaginar una situación así si la materia oscura fuera una ilusión óptica producida por una gravedad modificada. Uno esperaría que si la cantidad de materia ordinaria de dos galaxias es parecida, la cantidad de materia oscura aparente que produciría la gravedad modificada también debería serlo.

Todas estas pruebas nos dan una respuesta convincente a la pregunta inicial de este capítulo: la materia oscura está verdaderamente ahí, aunque aún no sepamos en realidad lo que es.

CAPÍTULO 3

El rastro de lo invisible en las reliquias del Big Bang

Hace 13 800 millones de años tuvo lugar una explosión de extraordinaria violencia, el Big Bang, de la que surgió todo el universo observable. La materia y la energía oscuras han jugado un papel importante en su evolución posterior, dejando un rastro detectable.

El hecho asombroso de que el universo surgiera de una gran explosión es un conocimiento científico de enorme trascendencia, que ha pasado a la cultura popular. Todo el mundo ha oído hablar del Big Bang y tiene una idea de lo que significa. La propia historia de cómo se llegó a ese conocimiento es también fascinante, y en este capítulo repasaremos sus hitos más importantes. En ese viaje encontraremos las pruebas que poseemos para poder afirmar que, efectivamente, las cosas sucedieron así, pruebas que también nos hablan de la existencia de la enigmática materia oscura, e incluso de la energía oscura.

En capítulos anteriores discutimos la ecuación principal de la teoría de la relatividad general, formulada por Einstein en 1915 (véase la ecuación [2], en la pág. 42). Recordemos: la presencia de materia y energía determina la manera en la que el espacio-tiempo se curva. Es sin duda un concepto muy difícil de imaginar, pero perfectamente posible de formular matemáticamente. En nuestra discusión enfatizamos el hecho de que una gran masa, por ejemplo el Sol, curva el espacio-tiempo a su alrededor. Pero las ecuaciones de la relatividad general se pueden aplicar también al universo como un todo. En ese caso, es el con-

tenido *total* de materia y energía del cosmos el que determina la curvatura global del espacio-tiempo. Este concepto de la teoría de la relatividad tiene una importancia crucial: la geometría del universo y su evolución están determinadas por la materia y la energía que contiene.

¿Y qué dicen las ecuaciones de la relatividad sobre la dinámica del universo? El propio Einstein comprobó que estas no admitían una solución en la que el universo fuera estático. Las ecuaciones indicaban que el universo debía atravesar necesariamente una fase de expansión. Esto le perturbó enormemente, ya que todas las observaciones de la época parecían mostrar un universo aproximadamente estático, en el que no se evidenciaba ninguna expansión cósmica. Debido a ello, Einstein modificó la forma original de sus ecuaciones, añadiéndoles un término, el llamado término de la «constante cosmológica», que hacía posible una solución estática. En cierto modo, la actitud de Einstein fue la de un científico consecuente: si las observaciones experimentales refutan las teorías, hay que renunciar a las segundas, o ajustarlas hasta que sean consistentes con los datos. Eso es exactamente lo que hizo. Sin embargo, la realidad es que los datos de la época no eran lo suficientemente buenos para refutar la teoría. Algunos años después, en 1929, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble, estudiando las velocidades de alejamiento de decenas de galaxias, pudo determinar que el universo se halla realmente en expansión, tal como predecían las ecuaciones originales de la relatividad general. Einstein se lamentó entonces de haber modificado sus ecuaciones, lo que consideró el mayor error científico de su vida. Ciertamente, su «excesiva» confianza en los datos, o tal vez el prejuicio de que el universo debía ser estático, le privó de hacer una predicción extraordinaria: que el universo debía hallarse en expansión. La ironía histórica es que, como veremos, el denostado (por el propio Einstein) término de la constante cosmológica regresaría muchos años después, en 1998, de la mano del descubrimiento de la energía oscura.

Otros investigadores, como el ruso Alexander Friedmann y el belga Georges Lemaître tuvieron más confianza que el propio Einstein en las ecuaciones originales de la relatividad general y predijeron, en los años veinte del siglo pasado, el fenómeno de la expansión del universo, e incluso llegaron al concepto de Big Bang, el instante de la gran explosión que dio origen a la expansión subsiguiente. Resulta sobrecogedor pensar que se pueda llegar a resultados tan formidables, nada menos que sobre el origen del universo, razonando sobre unas ecuaciones matemáticas que caben en una línea (recordemos la ecuación principal de la teoría de la relatividad general, pág. 42), pero así sucedió. Naturalmente, en ciencia no basta con escribir bellas teorías y hacer especulaciones brillantes: hay que buscar pruebas experimentales que las avalen.

Es importante tener en mente que la teoría del Big Bang, desarrollada por Friedmann, Lemaître y científicos posteriores, no es una mera descripción cualitativa de la gran explosión, sino una teoría precisa, cuantitativa, que explica en detalle cómo el universo fue expandiéndose, a la vez que su densidad y su temperatura disminuían. Este último punto es crucial: el universo se enfría a la vez que se expande. No es algo muy extraño, todos hemos experimentado el mismo fenómeno a la inversa: cuando un gas se comprime, se calienta; por ejemplo, cuando apretamos el émbolo de una bomba de inflar ruedas de bicicleta. Por tanto, cuanto más retrocedemos en el tiempo hacia el instante del Big Bang, lo que encontramos es un universo cada vez más denso y caliente. La figura 1 muestra cuál era la temperatura correspondiente a cada instante posterior al Big Bang, según la teoría. Como se puede observar, si nos acercamos lo suficiente al instante inicial, la temperatura crece de forma gigantesca. Por ejemplo, cuando el universo tenía un segundo su temperatura era de 10 000 millones de grados.

Todo esto es tan extraordinario que podría parecer una mera especulación, imposible de comprobar. Sin embargo, lo maravilloso es que tenemos pruebas abrumadoras de que las cosas transcurrieron tal como dice la teoría. La primera prueba es la propia expansión cósmica, que es una continuación de aquella explosión inicial, y dentro de la cual estamos nosotros. Pero tenemos más pruebas. La idea básica es la siguiente: cuando la materia se enfría experimenta cambios. Por ejemplo, si la tem-

peratura del vapor de agua desciende por debajo de los 100 °C, este se condensa en forma de agua líquida, y si la temperatura sigue descendiendo hasta alcanzar los 0 °C, esa agua se convierte en hielo. Estos cambios pueden dejar marcas perdurables. Por ejemplo, cuando el agua que se filtra en las pequeñas fisuras de las rocas se congela, puede causar grandes grietas y roturas en las mismas. Esas grietas son visibles millones de años después de que se hayan producido y, analizadas por los geólogos, ofrecen un testimonio de los fenómenos atmosféricos ocurridos en el pasado. En nuestro caso la temperatura del universo muy primitivo era gigantesca, y al ir descendiendo produjo cambios sucesivos en la materia. Algunos de esos cambios han dejado en el universo huellas visibles hoy en día, huellas que confirman la teoría del Big Bang con enorme precisión... y que también nos hablan de la materia y la energía oscuras.

LA NUCLEOSÍNTESIS PRIMITIVA

Todas las sustancias ordinarias están hechas de átomos. Recordemos la estructura de un átomo: un núcleo formado por protones (partículas de carga positiva) y neutrones (partículas neutras), alrededor del cual giran electrones (partículas de carga negativa). La carga eléctrica de un electrón es igual a la de un protón, pero de signo contrario. Como en un átomo hay tantos protones como electrones, su carga eléctrica total es cero. Por otro lado, el número de neutrones varía de unos átomos a otros.

El átomo más simple es el de hidrógeno, cuyo núcleo está constituido por un solitario protón, alrededor del cual orbita un electrón. Los átomos de los demás elementos químicos (helio, oxígeno, hierro, etc.) son más complejos y siempre tienen un número sustancial de neutrones en el núcleo. La figura 2 muestra un átomo de helio, cuyo núcleo está formado por dos protones y dos neutrones.

Así es como se nos presentan las sustancias ordinarias hoy en día, pero no siempre fue así. Según la teoría del Big Bang, cuando el universo tenía unos cien segundos de vida su temperatura era de unos mil millones de grados (véase la figura 1). ¿Cómo era el universo en ese momento? La temperatura era tan alta que las partículas que componen los átomos (protones, neutrones y electrones) estaban desgajadas unas de otras y se movían a grandes velocidades. Además de protones, neutrones y electrones, había muchos fotones (partículas de luz), neutri-

FIG. 1

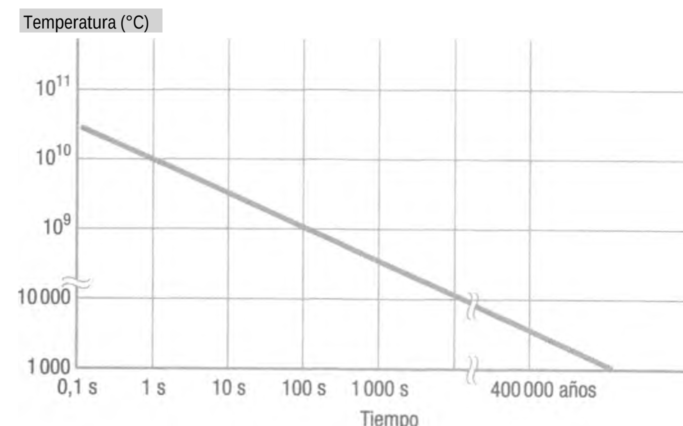
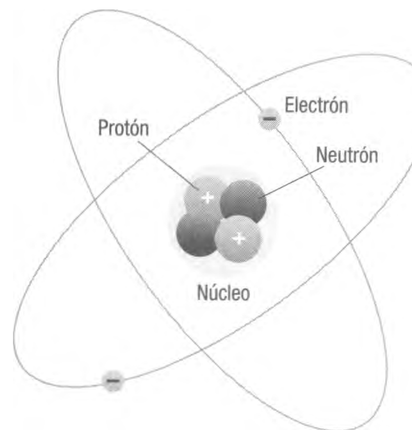
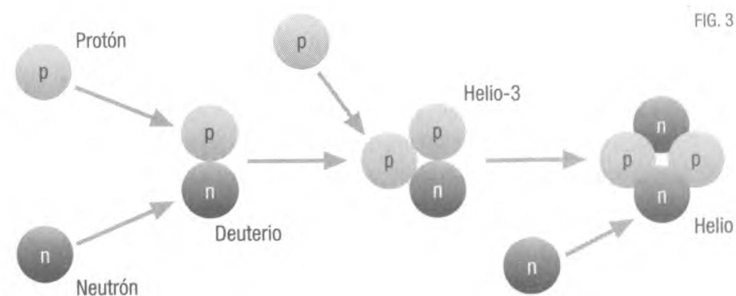


FIG. 2



La gráfica representa la temperatura del universo desde los primeros instantes después del Big Bang hasta que tenía unos cientos de miles de años. Se observa que el universo, en su expansión, se fue enfriando significativamente. A la izquierda, representación esquemática de un átomo de helio. En los primeros momentos del universo, debido a la altísima temperatura reinante, no existían núcleos compuestos, como los del helio, sino que las partículas que los componen estaban desgajadas unas de otras.



Cuando el universo tenía unos pocos minutos, parte de los protones y neutrones se agruparon, formando núcleos de átomos complejos ligeros, como los de deuterio, helio-3 o helio. Aquel proceso se conoce con el nombre de nucleosíntesis, y es semejante al que tiene lugar en el interior de las estrellas.

nos (partículas neutras muy ligeras de las que hablaremos más adelante) y posiblemente partículas de otros tipos. El universo era un lugar infernal y no presentaba las estructuras que ahora nos resultan familiares: galaxias, estrellas, planetas. Ni siquiera poseía átomos o núcleos atómicos, con la excepción de núcleos de hidrógeno, o sea protones.

Pero en ese momento se dieron las condiciones adecuadas de densidad y temperatura para que se produjera un fenómeno llamado *nucleosíntesis*, gracias al cual una parte de los protones y neutrones se fusionaron para formar núcleos atómicos complejos, por ejemplo, de helio. Es el mismo tipo de procesos que tienen lugar en el interior de las estrellas, y en los cuales se libera la luz y el calor que emiten. Son también los procesos que tienen lugar en la explosión de una bomba nuclear de fusión, y los mismos que se espera poder controlar algún día para producir energía limpia y prácticamente inagotable.

Volviendo al universo primitivo, una parte de los neutrones se fusionó con los protones para producir helio y otros núcleos compuestos. La figura 3 muestra una cadena de dichos procesos. En ella vemos cómo un neutrón se fusiona con un protón para formar un núcleo de deuterio, el cual puede captar un protón adicional formando un núcleo de helio-3, que a su vez puede captar un nuevo neutrón, dando lugar a un núcleo de helio (dos protones y dos neutrones). De esta manera, según la teoría del Big Bang, se tuvo que generar una gran cantidad de núcleos de helio y cantidades más pequeñas de otros núcleos ligeros, como deuterio, helio-3 y litio. (Núcleos más pesados, como los de carbono, oxígeno y hierro, se formaron mucho después en el interior de las estrellas; mientras que los núcleos más pesados que el hierro, como los del oro y el plomo, se han formado en circunstancias especiales, como las supernovas, es decir, estrellas en explosión.) Además, una parte importante de los protones originales, o sea núcleos de hidrógeno, permanecieron desligados. Más adelante, todos estos núcleos atraparon electrones a su alrededor formando los átomos ordinarios. Utilizando las ecuaciones de la relatividad general y todo lo que se sabe acerca de los procesos nucleares es posible calcular qué porcentaje de helio y de otros núcleos se formó en aquellos primeros minutos; estos valores se muestran en la tabla siguiente:

Tipo de núcleo	Proporción respecto al total
Helio	25 por ciento
Deuterio	3 partes por cada 100 000
Helio-3	1 parte por cada 100 000
Litio	5 partes por cada 10000 millones

Esta es la predicción de la teoría. Pues bien, midiendo en el universo actual la abundancia de estos elementos, se encuentran porcentajes que concuerdan perfectamente (dentro de los errores teóricos y experimentales) con los números de la tabla. Esto representa un gran triunfo de la teoría. Las abundancias cósmicas de los elementos ligeros ofrecen un testimonio impresionante de lo que aconteció cuando el universo tenía apenas unos minutos de existencia.

¿QUÉ HABÍA ANTES DEL BIG BANG?

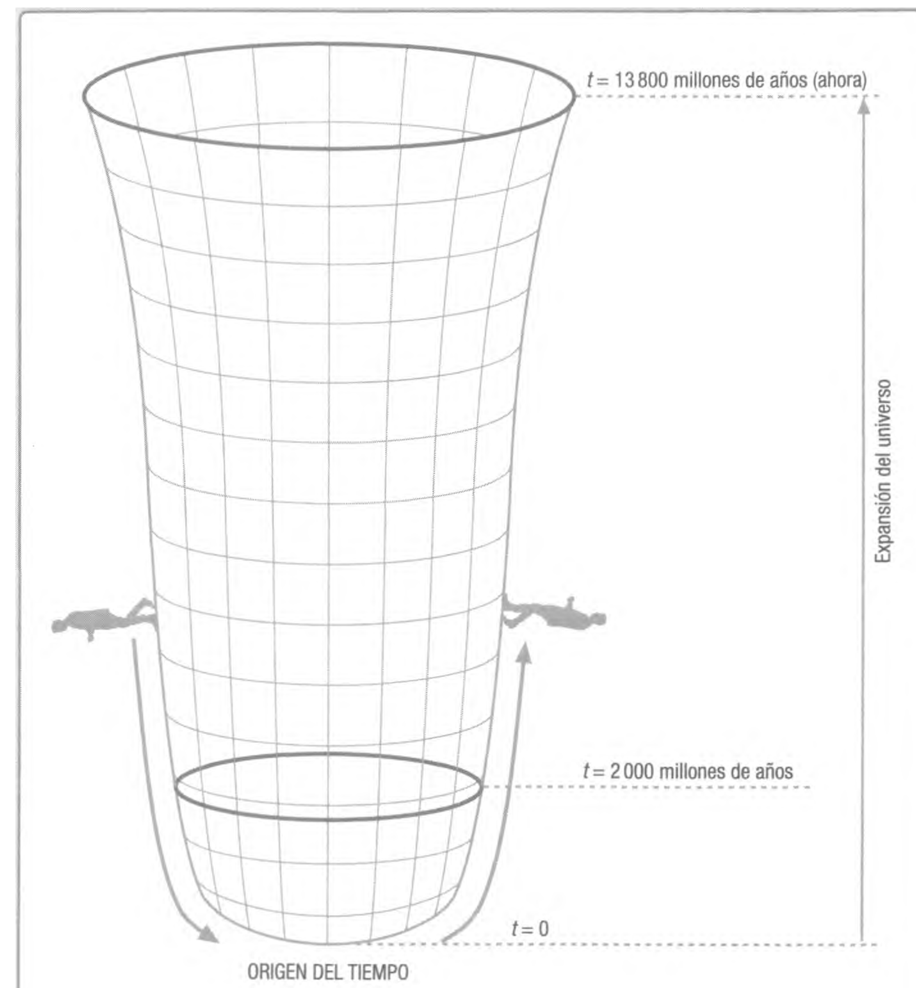
La respuesta habitual a esta cuestión es que «según la teoría, el tiempo (y el espacio) nació en ese instante; por lo tanto, no tiene sentido preguntarse qué había antes de ese primer instante». Esto es correcto, pero se puede matizar un poco. En primer lugar, hay que entender que muchas veces se tiende instintivamente a extrapolar conceptos que funcionan bien en las escalas cotidianas más allá de las mismas, como si tuvieran validez universal. Pero, a menudo, esa actitud falla estrepitosamente. Por ejemplo, si juzgáramos la forma de la Tierra por lo que vemos en nuestra experiencia cotidiana, diríamos que la Tierra es plana (como les pareció a la mayor parte de las civilizaciones antiguas). Por tanto, uno podría caminar en una dirección cualquiera, por ejemplo hacia el Sur, de forma Indefinida. Pero, una vez que sabemos que la Tierra es redonda, comprendemos que hay un punto, el polo Sur, más allá del cual no podemos continuar en esa dirección.

El «polo Sur» del tiempo

Del mismo modo, las ecuaciones de la relatividad general nos muestran que el espacio-tiempo tiene una especie de «polo Sur» más allá del cual no podemos remontamos en el tiempo. Esto se ilustra en la figura, que representa el espacio-tiempo del universo como un inmenso dedal. En ella el tiempo avanza hacia arriba. Si cortamos rodajas del dedal a diferentes alturas, lo que encontramos son anillos que representan el universo en diversos momentos. A medida que avanzamos en el tiempo los anillos son cada vez más grandes, debido a la expansión del universo. El punto de la base del dedal representa el Big Bang. En esta imagen, retroceder (mentalmente) en el tiempo equivale a deslizarse por la superficie del dedal hacia abajo. Pero está claro que una vez que alcanzamos el «polo Sur» del tiempo (el Big Bang), ya no podemos remontarnos más atrás. Si insistimos en «continuar en la misma dirección», lo que conseguimos es volver a avanzar en el tiempo.

Cautelas

Sin embargo, hay que añadir dos advertencias. La primera es que las ecuaciones de la relatividad muestran una sospechosa singularidad en el Big Bang. Concretamente, ciertas cantidades físicas se hacen allí infinitas, y las ecuaciones se vuelven inmanejables. Esto tal vez signifique que la descripción que hace la teoría del preciso instante inicial no es fiable, por lo que quizá no fuera exactamente como acabamos de describir; incluso podría haber una historia anterior al mismo. De hecho, debido a esta y otras dificultades teóricas, la mayoría de los físicos teóricos creen que la teoría de la relatividad no es completa. La segunda advertencia se refiere a las pruebas experimentales que tenemos del Big Bang. Si nos remontamos hasta un segundo después del instante inicial, estamos muy seguros de que las cosas transcurrieron como nos dice la teoría porque tenemos pruebas abrumadoras de ello, concretamente la abundancia de elementos ligeros producidos en la nucleosíntesis primitiva. Si seguimos acercándonos hasta una diezmilmillonésima de segundo, aunque no tenemos pruebas, estamos razonablemente seguros de saber lo que pasó, ya que disponemos de una teoría de las partículas elementales (comprobada experimentalmente) que describe muy bien la materia a las gigantescas temperaturas que reinaban entonces. Pero si seguimos acercándonos al Big Bang, la temperatura crece de tal manera que ni siquiera disponemos de una teoría *comprobada* para describir la materia a esas energías.



Según la teoría del Big Bang, si pudiéramos retroceder en el tiempo, llegaría un instante, correspondiente a la «Gran Explosión», en que no podríamos remontarnos más allá. Si insistiéramos en seguir retrocediendo en el tiempo, lo que haríamos sería volver hacia delante; como cuando se alcanza el polo Sur de la Tierra y uno insiste en seguir en la misma dirección: lo que se consigue es avanzar en dirección Norte. No obstante, muy cerca del primerísimo instante inicial, la incertidumbre teórica y experimental crece enormemente, por lo que la descripción anterior podría necesitar modificaciones.

La idea de evaluar la producción de elementos en el universo primitivo fue propuesta en la década de 1940 por varios científicos: Ralph Alpher, Hans Bethe, Robert Herman y George Gamow. En los años setenta los cálculos fueron enormemente refinados y, de hecho, contienen muchas sutilezas en las que no vamos a entrar, aunque sí es preciso destacar un aspecto: para realizar los cálculos hay que utilizar el valor de una magnitud importante, la densidad de materia *ordinaria* del universo. Esta magnitud está bien medida a partir de las observaciones de las galaxias y el gas intergaláctico. Cuando se utiliza ese valor en los cálculos de la nucleosíntesis se obtienen las abundancias de elementos ligeros mostradas en la tabla anterior, que concuerdan admirablemente con las abundancias observadas. Esto quiere decir que la materia oscura (recordemos: seis veces más abundante que la ordinaria) *no* puede ser materia ordinaria que, por algún motivo, no hayamos sido capaces de detectar; por ejemplo, pequeños asteroides vagando por el espacio interestelar. Si la materia oscura fuera alguna forma de materia ordinaria, eso significaría que la densidad auténtica de materia ordinaria no sería la que observamos, sino siete veces mayor. Pero entonces los cálculos de la nucleosíntesis primitiva para la abundancia de elementos ligeros no concordarían en absoluto con las observaciones. Las abundancias de los elementos mostradas en la tabla de la pág. 67 nos indican que esencialmente no hay más materia ordinaria que la que realmente se puede observar en el universo. Por tanto, la materia oscura ha de ser «otra cosa».

LA RECOMBINACIÓN

Cuando el universo tenía unos 300 segundos, su temperatura había descendido a unos 600 millones de grados y el proceso de nucleosíntesis de elementos ligeros prácticamente había concluido. El universo había quedado lleno de núcleos atómicos (cargados positivamente), fundamentalmente de hidrógeno y helio, y electrones (cargados negativamente); además, había gran cantidad de fotones (partículas de luz). Este tipo de materia, formado por partículas cargadas interaccionando con fotones, es lo que se denomina *plasma*. Por tanto, la mayor parte de la materia ordinaria se encontraba en forma de plasma.

> La verdad es más extraña que la ficción, porque la ficción ha de ser verosímil.
>
> Mark Twain

Curiosamente, esto sigue siendo cierto hoy en día: la mayor parte de la materia ordinaria se encuentra en forma de gas intergaláctico, compuesto básicamente de hidrógeno y helio, cuyos átomos están totalmente ionizados, es decir, han perdido todos sus electrones, los cuales viajan desgajados de sus núcleos. Así que el gas intergaláctico es también un plasma, pero de densidad muy inferior al que reinaba en el universo en aquella época primitiva. Las estrellas, como el Sol, también están hechas de plasma muy semejante al del universo primitivo, aunque de mayor densidad.

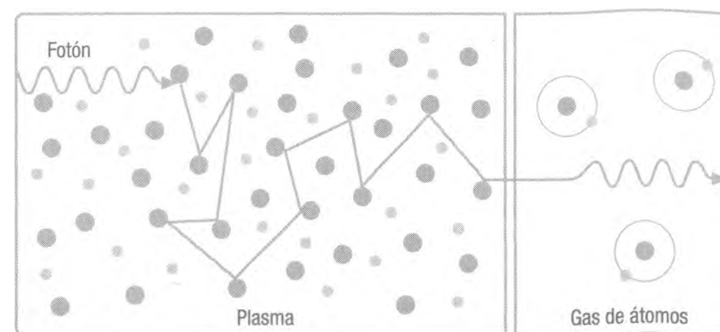
Además del plasma, en el universo primitivo había una cierta densidad de materia en forma de neutrinos, y también estaba la materia oscura. Pero tanto los neutrinos como la materia oscura apenas interaccionaban con el plasma de materia ordinaria. Esta situación se mantuvo durante varios cientos de miles de años, durante los cuales apenas sucedieron acontecimientos reseñables, excepto que el universo siguió expandiéndose y enfriándose. ¿Qué aspecto tenía el universo en ese periodo? En aquel plasma primitivo, los fotones no podían recorrer mucha distancia sin ser interrumpidos por las partículas cargadas (núcleos atómicos y electrones). Esto se debe a que la luz no es otra cosa que radiación electromagnética, que interacciona fuertemente con las partículas cargadas eléctricamente. Esta idea está ilustrada en la parte izquierda de la figura 4, donde vemos la trayectoria zigzagueante de un fotón.

Por tanto, el universo era luminoso, dado que había muchos fotones, pero no era transparente, ya que estos cambiaban continuamente de dirección. Podemos decir que el universo era translúcido, como si estuviera lleno de una niebla luminosa y muy homogénea. A medida que siguió enfriándose, las partículas fueron frenándose y los fotones haciéndose menos energéticos. Cuando el universo tenía 380 000 años, la temperatura había descendi-

do hasta unos 3 000 °C, y los electrones ya eran suficientemente lentos para ser capturados por los núcleos. Este acontecimiento trascendental se denomina *recombinación*, aunque sería más exacto llamarle «combinación», ya que nunca antes los electrones habían estado ligados a los núcleos. Fue el nacimiento de los átomos, igual que la nucleosíntesis primitiva supuso el nacimiento de los primeros núcleos atómicos complejos. Todo el plasma se convirtió en un gas de átomos (básicamente hidrógeno y helio). Como consecuencia, el universo se hizo transparente, puesto que los átomos son neutros y no interaccionan fuertemente con la luz. Los fotones pudieron por fin viajar en línea recta sin interrupciones. Aquellos fotones liberados cuando el universo tenía 380 000 años han seguido viajando sin cesar, y actualmente constituyen la llamada *radiación de fondo* (o fondo cósmico de microondas), que fue detectada por vez primera por dos jóvenes radioastrónomos estadounidenses, Amo A. Penzias y Robert W. Wilson en 1964-1965, trabajo por el que recibieron el premio Nobel en 1978.

Una confusión común cuando se piensa en la radiación de fondo es creer que es un «fogonazo» que proviene del lugar donde ocurrió el Big Bang. Esta creencia contiene dos errores importantes. Primero, el Big Bang no ocurrió en ningún lugar concreto del universo: según la teoría de la relatividad, cuando el universo se expande es el propio espacio el que se estira como un trozo de goma, por lo que las galaxias situadas en él se separan unas de otras. Una buena imagen de esto, en dos dimensiones, es la de un globo con las galaxias dibujadas en su superficie, que van separándose a medida que el globo se hincha. Si echamos marcha atrás en el tiempo (globo deshinchándose), las galaxias aparecen cada vez más juntas, hasta que el globo está totalmente contraído. En ese momento («Big Bang»), no solo las galaxias están juntas, sino que el propio espacio (la superficie del globo) está reducido a «un punto». De la misma forma, todo nuestro espacio observable estuvo reducido a «un punto», por lo que puede decirse que el Big Bang sucedió en todos los puntos a la vez, solo que en aquel momento estaban todos reunidos. El segundo error es creer que la radiación de fondo se

FIG.4



En el universo primitivo, las partículas cargadas eléctricamente (núcleos atómicos y electrones) interactuaban con los fotones de luz, creando un tipo de materia denominado plasma. El enfriamiento progresivo permitió a los núcleos capturar los electrones, convirtiendo el plasma en un gas de átomos, eléctricamente neutros. A partir de entonces los fotones viajaron libremente hasta nuestros días, constituyendo el fondo cósmico de radiación.

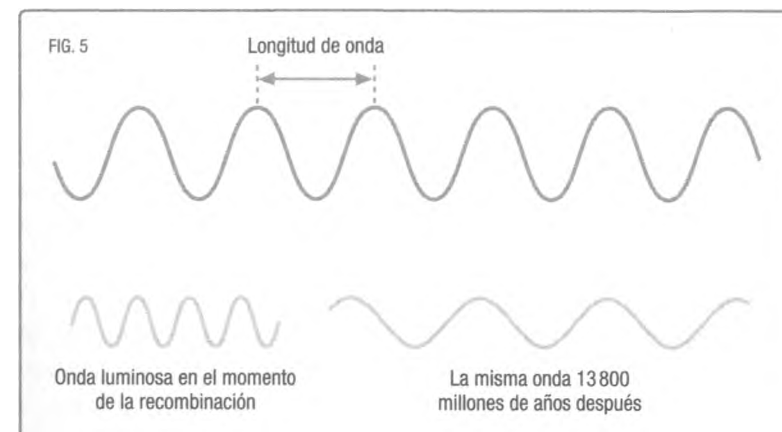
produjo en el mismo instante del Big Bang. Realmente se produjo 380 000 años después. En ese momento el universo ya era grande, y entonces se hizo transparente y se llenó de luz que se propagaba en todas las direcciones. Debido a ello, los fotones de la radiación de fondo nos llegan hoy en día desde todas las direcciones.

Los fotones que fueron liberados en el momento de la recombinación eran todavía muy energéticos, con una temperatura de 3 000 °C. Sin embargo, a medida que el universo se ha ido expandiendo, aquellos fotones han ido perdiendo energía. Para entender esto hay que recordar que la luz son ondas luminosas, parecidas a las que se forman en el agua cuando arrojamos una piedra a un estanque, solo que, en vez de ser agua lo que oscila, son los campos eléctricos y magnéticos. La distancia entre dos crestas de una onda es la llamada *longitud de onda*. Como el espacio ha ido estirándose a lo largo de estos 13 800 millones de años, las ondas luminosas también lo han hecho; en otras palabras, su longitud de onda ha aumentado. Esto está ilustrado en la figura 5.

En realidad, el estiramiento ha sido mucho mayor de lo que representa la figura: aproximadamente un factor mil, por lo que aquella luz primitiva, que en un principio era visible, se ha convertido en una radiación de microondas, parecida a la que produce un homo de microondas doméstico, pero mucho más débil. Sucede que los fotones son *menos* energéticos cuanto mayor sea la longitud de la onda a la que están asociados (un resultado de la física cuántica). Por tanto, los fotones de la radiación de fondo son hoy en día mil veces menos energéticos que en el momento de la recombinación. Si entonces correspondían a una temperatura de 3 000 °C, ahora corresponden a una temperatura mil veces menor: unos tres grados por encima del cero absoluto de temperaturas, o, lo que es lo mismo, unos -270 °C. Esta fue la radiación encontrada por Penzias y Wilson, en perfecto acuerdo con las predicciones de la teoría del Big Bang.

Por cierto, Penzias y Wilson no buscaban detectar la radiación de fondo, en realidad ni siquiera sabían que la teoría del Big Bang predecía dicha radiación. Lo que querían era reutilizar una antena de la compañía Bell Telephone, construida para comunicaciones por satélite, para detectar ondas de radio emitidas por nuestra galaxia. Sin embargo, al hacer pruebas con la antena encontraron una extraña radiación de microondas, cuyo origen no conseguían identificar. Aquella radiación parásita tenía propiedades sorprendentes: no cambiaba con la hora del día ni la estación del año; tampoco dependía de la orientación, ya que por todas las direcciones llegaba exactamente la misma enigmática señal. Su honestidad profesional hizo que no se rindieran en la búsqueda del origen de esa radiación, hasta que, gracias a la labor mediadora de importantes físicos, supieron que se ajustaba a la predicción teórica del Big Bang. Notemos de paso que la radiación de fondo no es algo que está solo en el espacio exterior, sino que se encuentra en todas partes, razón por la que Penzias y Wilson pudieron detectarla con una antena en tierra.

La radiación de fondo es la reliquia más importante que poseemos de la época del Big Bang. La información que hay codificada en la misma acerca del universo primitivo es realmente extraordinaria. En los últimos veinte años se han dado grandes pasos para descodificar esa información, pero es una tarea que aún no ha concluido y que constituye un campo de investigación puntero.



FLUCTUACIONES EN LA RADIACIÓN DE FONDO

En 1969 se descubrió que la radiación de fondo no es perfectamente isótropa, o sea, igual en todas las direcciones, sino que muestra una dirección «privilegiada» desde la que nos llegan fotones ligeramente desplazados hacia el rojo, es decir, menos energéticos, mientras que en la dirección opuesta nos llegan ligeramente desplazados al azul, más energéticos. Este hecho se debe a que nuestra galaxia, la Vía Láctea, se mueve con una velocidad peculiar respecto al fondo de microondas. Los fotones que nos llegan «por detrás» los percibimos menos energéticos (su frecuencia se desplaza al rojo), y los que nos llegan «de frente» los vemos más energéticos (su frecuencia se desplaza hacia el azul). Precisamente gracias a esta anisotropía sabemos que nos estamos desplazando a 380 km/s con respecto al fondo de radiación, en dirección hacia la constelación de Virgo. Una vez que esta anisotropía, debida a nuestro movimiento peculiar, fue «extraída» de los datos, la radiación de fondo parecía absoluta-

mente homogénea: miráramos hacia donde miráramos la temperatura era la misma, o sea, los fotones nos llegaban «igual de calientes» en todas las direcciones. Y esto es lo que se observó durante muchos años.

Sin embargo, los científicos sospechaban que esta homogeneidad absoluta no podía ser perfecta. De haberlo sido, no podrían haberse formado las estructuras que vemos en el universo, como galaxias, cúmulos de galaxias, etc., o lo habrían hecho en mucha menor medida. Por fin, en 1992, el satélite COBE detectó las deseadas inhomogeneidades o fluctuaciones en la radiación de fondo. Se trata de variaciones de temperatura muy pequeñas, del orden de las diezmilésimas de grado (que es lo que se esperaba). Los responsables del experimento, George Smoot y John Mather, recibieron por ello el premio Nobel en 2006. Desde entonces las medidas de estas fluctuaciones se han refinado extraordinariamente. El último mapa completo de las mismas, y el más preciso, es el trazado por el satélite europeo Planck, reproducido en las págs. 78-79, y que ya se ha convertido en una imagen popular. Ese mapa representa el cielo, y el color de cada punto indica la temperatura de los fotones que nos llegan desde ese lugar del cielo: los más claros (rojos en la imagen original), más calientes que el promedio; los más oscuros (azules en dicha imagen), más fríos.

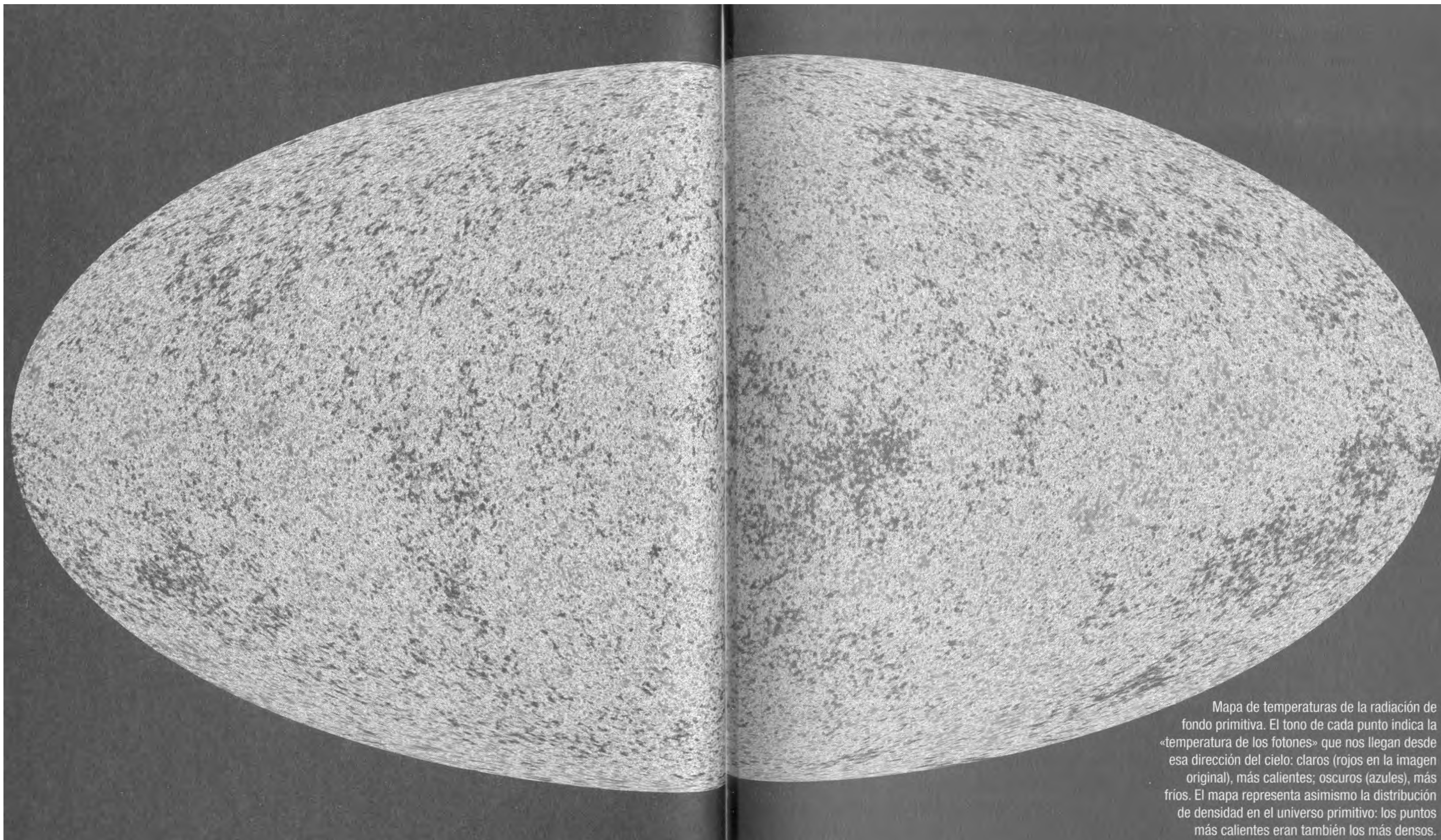
Pensemos ahora en lo siguiente: los fotones de la radiación de fondo que llegan en este instante a la Tierra desde todas las direcciones fueron liberados en el momento de la recombinación. Por tanto, todos ellos partieron de una esfera imaginaria gigantesca, en cuyo centro estamos nosotros. Debido a ello, la temperatura que leemos en cada fotón refleja la temperatura del punto de esa esfera del cual partió en aquel instante de la recombinación. Más exactamente: la temperatura que tenía aquel punto era la temperatura que medimos ahora multiplicada aproximadamente por mil, ya que, como hemos dicho, los fotones se han ido enfriando en esa proporción debido a la expansión del universo. En definitiva, el mapa representa las pequeñas variaciones de temperatura que había en una gran esfera del universo primitivo, en cuyo centro estamos nosotros.

¿Por qué es tan importante todo esto? Al fin y al cabo, esas variaciones eran pequeñísimas; ¿por qué habrían de preocuparnos? La razón es que es precisamente en esas fluctuaciones donde se encuentra codificada una extraordinaria cantidad de información acerca del universo primitivo. Para entenderlo mejor debemos avanzar un poco más en el significado del mapa reproducido en las págs. 78-79. Recordemos que hasta el instante de la recombinación el universo había estado lleno de un plasma, una sopa de núcleos atómicos y electrones. Nuestro mapa de temperaturas refleja, por tanto, la distribución de temperaturas en dicho plasma. Por otro lado, en un plasma como aquel, las zonas más calientes eran también las más densas: recordemos que la masa y la energía son conceptos equivalentes, por lo que las zonas con fotones más energéticos (más calientes) tenían una densidad mayor. Así que el famoso mapa de temperaturas es también un mapa de *densidades* del universo primitivo. Realmente, el mapa es una foto de cómo era el universo en el momento de la recombinación, 380 000 años después del Big Bang, y es, de hecho, la imagen más antigua que tenemos del universo. En ella se observa que era casi perfectamente homogéneo... pero no del todo. ¿A qué se debían esas pequeñas fluctuaciones de temperatura y densidad?

El sonido del universo primitivo

El origen de las fluctuaciones de densidad eran simplemente las ondas sonoras que surcaban aquel espacio primitivo. De hecho, las ondas sonoras ordinarias no son más que perturbaciones minúsculas de presión y densidad que se propagan por el aire a la velocidad del sonido, como ilustra la figura 6.

La distancia entre dos zonas con la máxima densidad es lo que se llama una longitud de onda. Por tanto, la distancia entre un punto de máxima densidad y uno de mínima es *media* longitud de onda. Imaginemos una habitación llena de sonido. Si hiciéramos un mapa de la densidad de aire en un instante dado, también encontraríamos minúsculas variaciones de densidad debidas a las



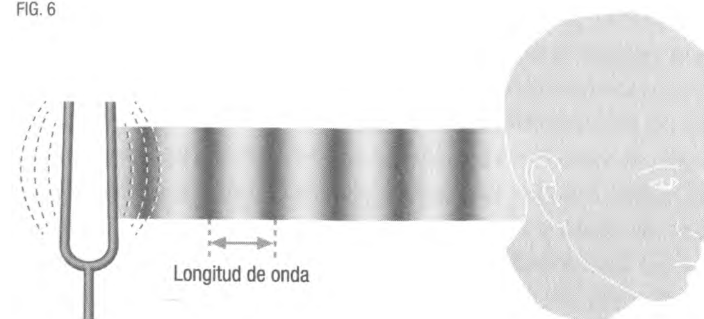
Mapa de temperaturas de la radiación de fondo primitiva. El tono de cada punto indica la «temperatura de los fotones» que nos llegan desde esa dirección del cielo: claros (rojos en la imagen original), más calientes; oscuros (azules), más fríos. El mapa representa asimismo la distribución de densidad en el universo primitivo: los puntos más calientes eran también los más densos.

ondas sonoras. Si el sonido fuera una nota musical pura (como la que produce un diapasón), lo que veríamos sería un mapa perfectamente regular, en el que las zonas más densas se alternan con las menos densas de forma sistemática, con una separación de media longitud de onda entre ellas.

Del mismo modo, si el universo primitivo hubiera estado lleno de una onda sonora pura, el mapa de densidades que observaríamos se parecería a un tablero de ajedrez, como el que muestra la figura 7. La distancia entre «dos casillas» consecutivas de ese tablero, correspondientes a puntos de máxima y mínima densidad, es de *media* longitud de onda, así que a la vista del mapa podríamos deducir inmediatamente la longitud de onda del sonido puro que llenaba el universo. Pero el mapa real (reproducido en las págs. 78-79) es bastante más caótico que un tablero de ajedrez, debido a que el universo primitivo estaba poblado por ondas sonoras de diferentes longitudes de onda. Las notas producidas por un instrumento musical tampoco son puras, sino que están constituidas por un tono dominante o *fundamental*, correspondiente a la nota pura, acompañado por tonos con otras longitudes de onda, llamados armónicos. Cada instrumento tiene un tipo de armónicos distinto, y esto es lo que hace que una nota musical producida por un violín suene distinta que la misma nota producida por una flauta. Aunque el tono fundamental es idéntico para ambos, el contenido de armónicos es diferente.

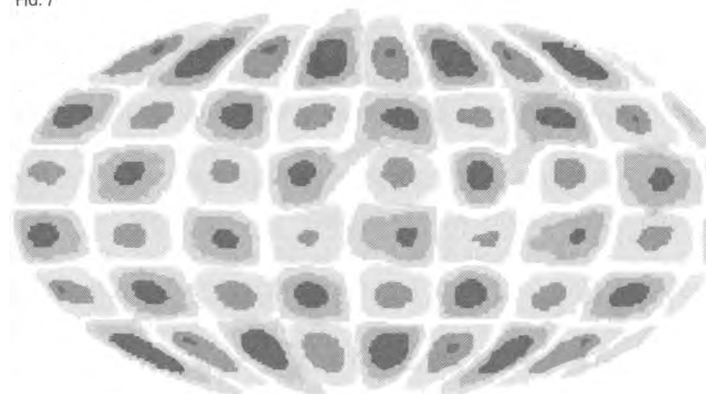
Volviendo a nuestro mapa sonoro del momento de la recombinación, podemos preguntamos: ¿cuál es la longitud de onda del tono fundamental y cuáles las de los armónicos? Esta información se puede obtener a partir de un análisis matemático cuidadoso del mapa, como enseguida comentaremos, pero incluso a simple vista se aprecia en él un «granulado básico», es decir, una distancia típica en la que es más frecuente que un punto caliente pase a frío y viceversa. Esa distancia corresponde a media longitud de onda del tono fundamental, y su tamaño aparente en el cielo subtiende un ángulo visual de un grado aproximadamente (para hacerse una idea: la Luna subtiende un ángulo de medio grado). Como hemos dicho, si solo existiera ese tono fundamental, el mapa sería totalmente regular, como

FIG. 6



En las ondas sonoras, las zonas de máxima densidad están espaciadas por una longitud de onda.

FIG. 7



Aspecto esquemático que tendría el mapa de densidades del universo primitivo si solo contuviera ondas sonoras de una misma longitud de onda. El mapa recuerda a un tablero de ajedrez.

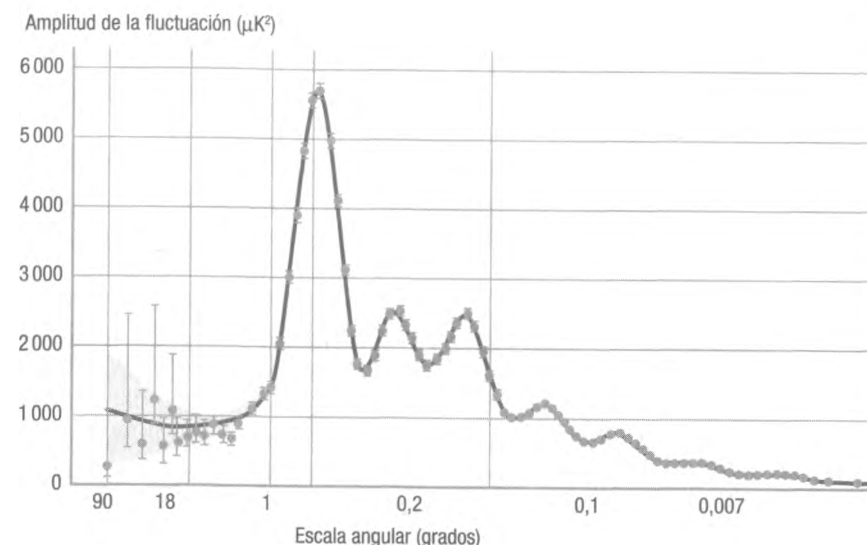
un tablero de ajedrez con muchas casillas, y el hecho de que no lo sea indica que había otras ondas pululando por el espacio primitivo: los armónicos. El análisis matemático confirma esta impresión visual. La figura 8 representa el contenido de cada longitud de onda en el mapa de la radiación de fondo, lo que

podemos llamar el «espectro sonoro» primitivo, tal como ha sido medido y analizado por el proyecto Planck en 2013.

En la figura vemos varios picos, correspondientes a las ondas sonoras dominantes que se propagaban por el universo en el momento de la recombinación. Concretamente, el primer pico está asociado al tono fundamental, y el resto de los picos a los armónicos. Sobre los ejes horizontal y vertical podemos leer sus longitudes de onda y sus intensidades, respectivamente. Notemos que el eje horizontal está en grados, ya que estamos midiendo las longitudes de onda por sus tamaños aparentes: los ángulos visuales que subtienden en el cielo. La altura de cada pico indica la amplitud de la onda correspondiente, es decir su intensidad.

Por ejemplo, el primer pico está situado en tomo a un ángulo de un grado. Con las convenciones de la figura, eso significa que *media* longitud de onda del tono fundamental ocupa un ángulo de un grado en el cielo. Además vemos que el primer pico es el más alto, lo que significa que el tono fundamental era la onda sonora más intensa, la que dominaba el sonido de aquel universo primitivo. Esto confirma la impresión visual de que, en el mapa de densidades, los puntos más densos (claros) y menos densos (oscuros) están típicamente separados por distancias aparentes del orden de un grado. Ese granulado básico es, efectivamente, debido al tono fundamental. Los tonos armónicos, asociados a los otros picos de la figura 8, tienen longitudes de onda más cortas (corresponden ángulos menores de un grado) y sus intensidades son también más pequeñas.

Centrémonos un poco más en el primer pico (tono fundamental). Como se ha dicho, la mitad de su longitud de onda ocupa en el cielo un arco de aproximadamente un grado, o sea la longitud de onda completa ocupa dos grados. Ese es el tamaño aparente con que la vemos en el cielo. ¿Cuál era su tamaño real (en kilómetros)? Recordemos que el mapa de la radiación de fondo que vemos corresponde a una esfera gigantesca desde la que, en el momento de la recombinación, partió la luz que ahora mismo nos llega. Así que es posible calcular cuánta distancia ocupaba en esa esfera un arco de dos grados: esa era la longitud de onda del modo fundamental. El resultado es, aproximadamente, un



Espectro sonoro del universo en el momento de la recombinación. Los puntos representan las observaciones con sus errores, mientras que la línea continua representa la predicción teórica. Se puede apreciar un magnífico acuerdo entre ambos.

millón de años-luz. Notemos que se trataba de una longitud de onda extraordinariamente larga. En cualquier caso, podemos preguntamos: ¿Por qué el modo fundamental tenía precisamente esa longitud de onda?

Las ondas que recorrían el universo primitivo se movían en todas las direcciones. Al superponerse dos ondas de la misma longitud de onda, moviéndose en sentidos contrarios, se formaban las llamadas *ondas estacionarias*. Es el mismo tipo de ondas que se forman cuando se pulsa la cuerda de una guitarra.

En la figura 9 observamos una cuerda vibrante cuyos extremos están fijos, como en una guitarra. Las ondas que se propagan en la cuerda rebotan en los extremos y se superponen con ellas mismas, produciendo la onda estacionaria dibujada. Las tres líneas, continua, de puntos y discontinua, representan la posición de la

cuerda en tres momentos sucesivos. La línea continua representa el estado inicial de la cuerda. La línea discontinua representa el estado alcanzado después de media oscilación, que es exactamente opuesto al inicial. Al final de una oscilación completa la cuerda vuelve a recuperar su forma inicial (línea continua). Tras una nueva media oscilación vuelve a adquirir la forma de la línea discontinua, y así sucesivamente. Notemos que cuando la cuerda está en uno de los dos estados extremos (línea continua o discontinua) es cuando la diferencia de altura entre una cumbre y un valle es mayor. En cualquier otro estado intermedio esa diferencia o «contraste» de alturas es menor, ya que las cumbres no son tan altas ni los valles tan profundos. De hecho, en el estado intermedio correspondiente a la línea de puntos, no hay cumbres ni valles en absoluto, no hay contraste de alturas.

En el caso de las ondas sonoras, las ondas estacionarias tienen exactamente las mismas características que acabamos de describir para una cuerda vibrante. La única diferencia es que, en vez de contraste de alturas, lo que presentan es contraste de densidades, ya que en una onda sonora lo que se propagan son variaciones de densidad. Así que, de forma totalmente análoga, para una onda sonora estacionaria el contraste máximo de *densidades* se consigue cuando la onda ha realizado media oscilación, o bien una oscilación completa, o una oscilación y media, etc.; es decir, un número exacto de medias oscilaciones.

Podemos aplicar estos conceptos al universo primitivo. Aunque inicialmente existieran ondas de todos los tipos, aquellas que *en el instante de la recombinación* hubieran realizado un número exacto de medias oscilaciones tendrían que ser las que en ese momento produjeran un mayor contraste de densidades. Concretamente, el modo fundamental debería corresponder a una onda sonora que, después de los primeros 380 000 años (desde el inicio del universo hasta el momento de la recombinación), hubiera tenido el tiempo justo de realizar *media* oscilación. Si esto es así, su periodo de oscilación, es decir, el tiempo que dura una oscilación completa, debería ser el doble de 380 000 años. Se trata de un periodo de oscilación enorme, muy distinto al de las ondas sonoras habituales, como enseguida comentaremos.



El universo primitivo contenía ondas sonoras estacionarias, similares a las que se crean al pulsar la cuerda de una guitarra. El esquema reproduce el estado de una cuerda vibrante en tres instantes sucesivos.

Por otro lado, sabiendo el periodo de oscilación de una onda y su velocidad de propagación (en este caso la velocidad del sonido en aquel plasma, que es conocida) se puede calcular su longitud de onda, que resulta ser de aproximadamente... un millón de años luz. Notemos que todo esto es un razonamiento teórico, basado en lo que le sucede a una onda estacionaria. Pero antes vimos que las observaciones del mapa de fluctuaciones indican que el modo fundamental que quedó «inmortalizado» en aquella imagen tenía una longitud de onda precisamente de un millón de años luz. ¡La predicción teórica y la observación concuerdan perfectamente! El razonamiento anterior implica asimismo que las ondas que en el momento de la recombinación habían realizado un número exacto de medias oscilaciones (una oscilación completa, una oscilación y media, etc.) estaban también en un momento propicio para producir máximo contraste de densidades. Puesto que en el mismo tiempo habían oscilado más veces, esto significa que sus periodos eran más cortos que el de la fundamental, concretamente la mitad, un tercio, un cuarto, etc. Y sus longitudes de onda eran también más cortas en la misma proporción. Esas ondas son los armónicos, cuyas longitudes de onda corresponden a los picos segundo, tercero, cuarto, etc., que se observan en el espectro sonoro de la figura 8, de nuevo en perfecto acuerdo con la teoría. Indudablemente, el mapa de densidades del universo primitivo constituye una prueba sensacional de la teoría del Big Bang.

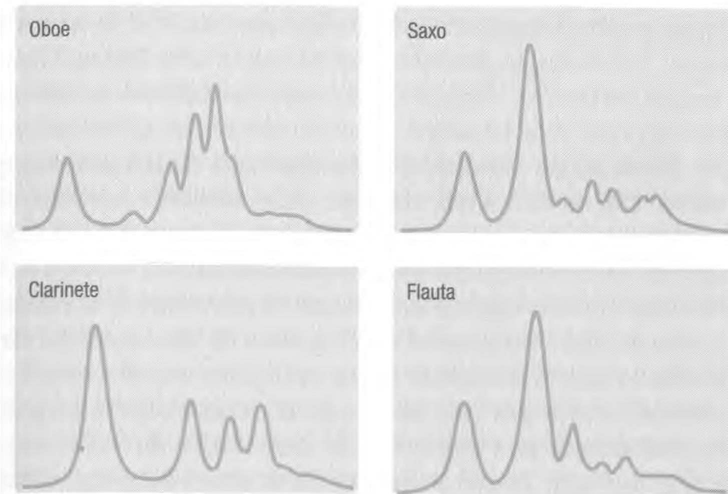
Reconstruyendo el universo a partir de su espectro sonoro

Resulta muy llamativo que, cualitativamente, el espectro sonoro del universo tenga un aspecto semejante al de un instrumento musical. Esto se ilustra en la figura 10, que representa el espectro sonoro de cuatro instrumentos musicales, y que puede compararse con el del universo, figura 8.

Sin embargo, a pesar de las apariencias, hay algunas diferencias importantes. En primer lugar, los periodos de oscilación de las ondas sonoras producidas por los instrumentos musicales son muy cortos: varían, aproximadamente, entre cincuenta millonésimas de segundo (sonidos muy agudos) y cincuenta milésimas de segundo (sonidos muy graves). Fuera de ese rango las ondas sonoras no son audibles. Pues bien, recordemos que el modo fundamental del universo primitivo había realizado media oscilación en 380 000 años, lo que significa que su periodo de oscilación era el doble: 760 000 años... ¡Absolutamente inaudible! Los armónicos tenían periodos más cortos, pero de un orden parecido, es decir, también inaudibles. Por tanto, aunque a veces se hable del «sonido del Big Bang» (¡incluso hay páginas web que lo reproducen!), lo cierto es que si un espectador hubiera podido presenciar aquella primera expansión no hubiera oído absolutamente nada. El Big Bang se produjo en un silencio sepulcral para el oído humano.

Otra diferencia que a menudo se ignora es la siguiente. Para un instrumento musical, el espectro sonoro indica la proporción del modo fundamental y de armónicos en la composición del sonido. Sin embargo, en el espectro sonoro del universo, reproducido en la figura 8, lo que vemos en realidad es qué modos estaban produciendo un contraste máximo de densidad *en el momento* de la recombinación. Si se hubiera hecho la foto 100 000 años antes, el modo fundamental habría sido otro: el que en ese momento hubiera terminado de realizar media oscilación, y que, por tanto, tenía un periodo de oscilación más corto. En realidad, el contenido de modos del universo primitivo era bastante uniforme: existían modos de todas las longitudes de onda en cantidades parecidas. Pero en el momento de la recombinación unas longitudes de onda eran más visibles que otras, y fueron esas las que quedaron impresas en la famosa instantánea de la radiación de fondo.

FIG. 10



Las gráficas corresponden al espectro sonoro de cuatro instrumentos musicales. Puede compararse su similitud cualitativa con el espectro sonoro del universo, representado en la figura 8.

No obstante todas las diferencias mencionadas, podemos establecer una analogía interesante entre el universo primitivo y un instrumento musical. A partir del espectro sonoro de un instrumento se pueden conocer muchos datos acerca del mismo. Por ejemplo, estudiando el espectro sonoro de una flauta se puede deducir de qué material está hecha e incluso su forma y longitud. Del mismo modo, el espectro sonoro primitivo nos proporciona información valiosa acerca de la forma geométrica del universo y su contenido de materia.

Pensemos en lo siguiente: después de media oscilación, la onda sonora del modo fundamental produjo un cierto contraste de densidades, lo que hizo que en algunas zonas aumentara ligeramente la densidad del plasma; es decir, en esos lugares la ma-

teria se comprimió. A este fenómeno colaboró la fuerza de atracción gravitatoria, que hace que la materia tienda a concentrarse. La fuerza gravitatoria depende a su vez de la cantidad de materia presente. Por tanto, la altura del primer pico de la figura 8 (que representa cuánto se comprimió la materia después de media oscilación) está relacionada con la densidad total de materia: a mayor densidad de materia, mayor contraste de densidades, y por tanto, mayor altura del pico. En otras palabras, a partir de la altura del primer pico se puede deducir la densidad total de materia del universo. ¿Y qué resultado se obtiene?

Conviene realizar aquí un inciso para explicar que la densidad del universo suele expresarse en unidades de una cantidad llamada *densidad crítica,* sobre la que enseguida volveremos. Por el momento nos basta con decir que la densidad crítica es de aproximadamente un miligramo por cada *billón* de kilómetros cúbicos. Pues bien, lo que se deduce de la altura del primer pico de la figura 8 es que la densidad de materia es aproximadamente un 32% de la densidad crítica. Lo fantástico es que ese es también el valor al que se llega a partir de las medidas actuales de las densidades de materia ordinaria y materia oscura del universo. La suma de ambas representa, aproximadamente, el 32% de la densidad crítica, en perfecto acuerdo con lo que nos dice la altura del primer pico del espectro sonoro primitivo.

El segundo pico de la figura 8 tiene que ver con la onda sonora que terminó de realizar una oscilación completa en el momento de la recombinación. Durante dicha oscilación, en algunos lugares la materia se comprimió y posteriormente sufrió una expansión o rebote, como un muelle que se comprime y luego se descomprime. La fuerza que impulsó el rebote provenía de la presión de la radiación del plasma, por lo que solo afectó a la materia en forma de plasma, es decir, la materia ordinaria. La materia oscura continuó comprimiéndose, mientras que el plasma se descomprimió. Esto hace que la altura del segundo pico sea menor que la del primero, a lo que contribuye también un efecto disipativo general. Así que la altura del segundo pico está relacionada con la cantidad de materia ordinaria. Y lo que se deduce de dicha altura es que la densidad de materia ordinaria es un 5% de la densidad crítica, de nuevo en extraordinario acuerdo con las medidas directas. Esto significa que el 27% restante (hasta completar el 32 % mencionado) es un tipo de materia distinto de la ordinaria y que no interacciona con ella; de haberlo hecho hubiera formado parte del plasma y habría rebotado con él. Esa es, naturalmente, la materia oscura. ¡Es realmente impresionante que, estudiando con ingenio las fluctuaciones de la radiación de microondas que nos llega del universo se pueda llegar a deducir la existencia de la materia oscura y su abundancia! Y eso no es todo...

El sentido común es la colección de prejuicios que una persona ha adquirido antes de los dieciocho años.

Albert Einstein

Hemos dicho que el granulado básico del mapa de la radiación de fondo indica que la mitad de la longitud de onda del tono sonoro fundamental subtiende en el cielo un ángulo de un grado aproximadamente. Esto se puede leer directamente de la posición del primer pico del espectro sonoro en la figura 8, y está simbolizado en la figura 12a. Ahora bien, al dibujar el triángulo de esta última figura estamos dando por sentado que el universo tiene geometría plana. Pero hemos dicho que, según la teoría de la relatividad, el espacio-tiempo del universo podría estar curvado *globalmente.* Recordemos que esa curvatura global depende de la densidad total de materia y *energía* del universo. Denotemos esa densidad con la letra griega p («ro»). Según las ecuaciones de la relatividad, si p tiene un valor especial, precisamente la ya mencionada *densidad crítica* (p_c), entonces el espacio es plano e infinito, que es como uno se imagina normalmente el espacio. Sin embargo, si p es mayor que p_c, entonces el espacio se curva (como ocurre cerca de una gran masa) y está cerrado de forma global, como la superficie bidimensional de una esfera, pero en tres dimensiones. Se escapa a la imaginación, pero no hay problema para formularlo matemáticamente. En ese caso el universo sería finito, aunque no tendría límites, igual que la superficie de la esfera. Por último, si p es menor que p_c, el espacio también está curvado, pero con curvatura negativa (la de la esfera es positiva). En la figura 11 están ilustrados, en dos dimensiones, esos tres tipos de espacio. Notemos que el

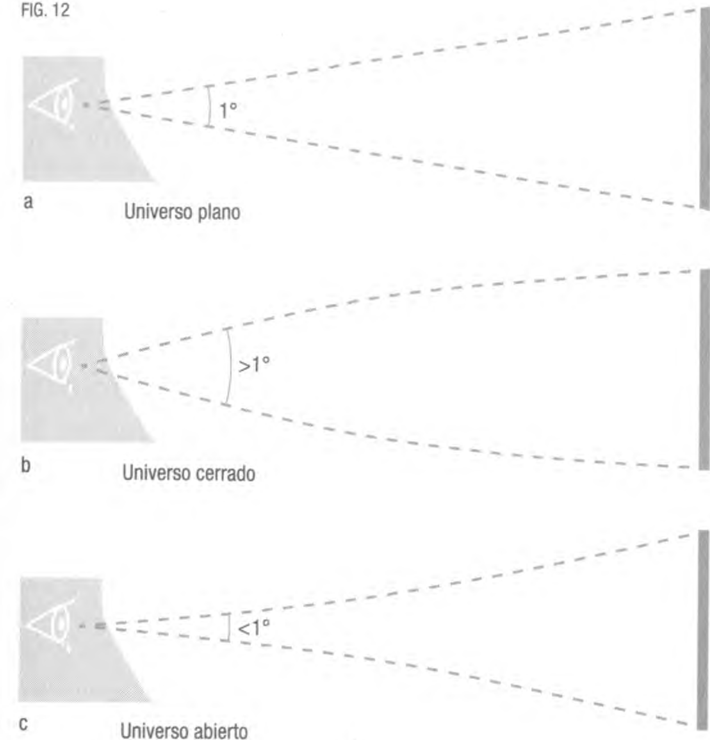
espacio de curvatura negativa (parecido a una silla de montar) se extiende infinitamente, al contrario que el de curvatura positiva. En consecuencia, estos tres tipos de espacio se denominan espacio (o universo) *plano*, *cerrado* y *abierto*. Hemos trazado un triángulo en cada tipo de superficie. Naturalmente, en el caso del plano los ángulos del triángulo suman 180°, mientras que en el universo cerrado la suma es mayor de 180°, y en el abierto es menor.

Por tanto, en un universo cerrado o abierto la figura 12a tendría el aspecto de la figura 12b y 12c, respectivamente. El ángulo visual aparente que ocuparía media longitud de onda del tono fundamental sería, respectivamente, mayor o menor que en el caso plano. Pero como ya hemos dicho, el ángulo que ocupa la longitud de onda fundamental en el cielo concuerda perfectamente con el que uno vería si el universo fuera plano. De ahí deducimos dos cosas importantes: que el universo es perfectamente, o casi perfectamente, plano, y que su densidad es, con gran exactitud, igual a la densidad crítica.

Recordemos que, a partir de las alturas de los dos primeros picos, se podía deducir que la suma de la materia ordinaria y la oscura representaba una densidad igual al 32% de la densidad crítica. Entonces, ¿dónde está el 68% que falta para completar la densidad crítica, que es la que tiene el universo, de acuerdo con la posición del primer pico del espectro sonoro? Ese 68% no puede ser materia ordinaria ni materia oscura, sino que ha de ser «otra cosa», y esa otra cosa es la energía oscura, de la que aquí encontramos un indicio importante, aunque históricamente no fue el primero, como veremos más adelante.

De todo lo dicho hasta ahora resulta claro que la radiación de fondo es un tesoro que contiene información valiosísima sobre el origen del universo, su forma y su composición. Es también admirable que la estructura de picos del espectro sonoro de la radiación de fondo fuera predicha mucho antes de que pudiera ser medida. Esto se debe al trabajo de muchos cosmólogos sobresalientes, como Sakharov, Peebels y Yu, y Sunyaev y Zeldóvich, en los años sesenta. Posteriormente sus cálculos fueron refinados por otros muchos autores. Por cierto, como se puede





La figura 11 ilustra los tres tipos de geometría posibles del universo: plana, cerrada o abierta. La suma de los ángulos de un triángulo en cada uno de estos tipos de universo es igual, mayor o menor que 180°, respectivamente. En un universo plano la longitud característica de las fluctuaciones de la radiación de fondo subtiende en el cielo un ángulo aproximado de un grado (fig. 12a). En un universo cerrado o abierto esa misma longitud subtiende un ángulo ligeramente mayor o menor, respectivamente (figs. 12b, 12c).

apreciar en la figura 8, el acuerdo entre teoría y observación es realmente maravilloso.

Mencionemos también que este tesoro de información es algo que está flotando a nuestro alrededor: recordemos que la radiación de fondo nos llega hasta la misma superficie de la Tierra de forma constante y desde todas las direcciones. Pero, naturalmente, detectar y descifrar esa información implica un soberbio trabajo observacional y un conocimiento profundo de la física involucrada, a lo que han contribuido numerosos científicos; todo un triunfo del ingenio humano.

CAPÍTULO 4

La naturaleza de la materia oscura. En busca de la «partícula X»

Neutralinos y axiones son algunos de los candidatos teóricos para encamar la misteriosa «partícula X» que forma la materia oscura. En el esfuerzo por descubrirla, por métodos diversos, participan instituciones científicas de todo el mundo.

Supongamos que se ha cometido un crimen. Puede darse la circunstancia afortunada de que la policía se encontrara cerca del escenario de los hechos y fuera capaz de capturar al asesino allí mismo. Naturalmente, en ese caso la policía conocería de forma inmediata las características físicas del asesino. Pero también puede darse el caso, más habitual, de que no estuviera presente; entonces tiene que investigar.

A partir de los indicios de todo tipo relacionados con el crimen, la policía elaborará un retrato robot del asesino. Es posible que esos indicios *no* sean suficientes para realizar un retrato muy preciso, del tipo «hombre alto, moreno, de ojos verdes, nariz aguileña y una cicatriz en la ceja izquierda»; pero aun así, los indicios pueden servir para descartar a muchos candidatos a criminal. Por ejemplo, a partir del hallazgo de un cabello la policía puede deducir que el asesino era un hombre moreno, y a partir de la profundidad de las pisadas marcadas en el polvo puede deducir su peso aproximado. Esto último permite muchas posibilidades, puesto que un hombre bajo y obeso puede tener el mismo peso que otro alto y delgado, pero muchas otras quedan descartadas.

Entonces, basándose en el retrato robot (aunque no sea muy preciso) y en toda la información disponible, la policía elaborará una lista de posibles sospechosos. Algunos quedarán descartados por otros elementos de información: por ejemplo, quizá no pueda ser ninguna de las personas con las que convivía la víctima porque todas ellas se hallaban lejos del lugar del crimen en el momento de cometerse. Finalmente, la policía identificará al criminal más probable y lo detendrá.

Algo parecido sucede con la materia oscura, el «criminal» de nuestra metáfora. Los indicios de que disponemos nos permiten dibujar un retrato robot preliminar de la misma. Aunque este retrato no es muy concreto, es suficiente para descartar algunos «sospechosos»: por ejemplo, las partículas de materia oscura no pueden ser las mismas que componen la materia ordinaria. Como veremos, hay otras partículas que dan mejor «el perfil de sospechosas» para desempeñar el papel de materia oscura.

Por el momento, compongamos un retrato robot inicial de la materia oscura a partir de toda la información descrita en las páginas precedentes:

— La materia oscura interacciona muy débilmente con la materia ordinaria; hasta ahora solo se ha observado la fuerza gravitatoria que ejerce sobre ella. Si hay otros tipos de interacciones entre los dos tipos de materia, han de ser muy débiles; de lo contrario, la materia oscura ya habría sido detectada de forma directa.

— La materia oscura no puede estar hecha de partículas ordinarias, concretamente de las mismas que constituyen los átomos: protones, neutrones y electrones; de lo contrario los cálculos de la nucleosíntesis primitiva arrojarían resultados contradictorios con los datos observacionales. Además, el espectro sonoro de la radiación de fondo nos indica que la materia oscura *no* formó parte del plasma primordial de materia ordinaria. De ahí deducimos que la materia oscura no puede estar hecha de partículas cargadas eléctricamente, ya que también habría formado parte del plasma primitivo.

— La materia oscura ha de ser muy estable, es decir, si se desintegra debe hacerlo a un ritmo muy lento. Sabemos que en el universo primitivo, en la época de la nucleosíntesis primitiva y de la recombinación, el porcentaje de materia oscura era aproximadamente el mismo que ahora. Así que la vida de una partícula oscura ha de ser como mínimo de 13 800 millones de años, los que lleva existiendo el universo.

— La materia oscura tampoco parece interaccionar mucho consigo misma. De hacerlo, habría constituido su propio plasma en el universo primitivo, pero los picos del espectro sonoro de la radiación de fondo indican que la materia oscura no era un plasma y que colapso gravitatoriamente sin rebotar (como sí lo hacía el plasma de materia ordinaria). Además, otras observaciones, como el Cúmulo Bala, indican que las nubes de materia oscura se atraviesan sin interaccionar entre ellas, lo que sugiere que la materia oscura no solo es invisible para nosotros sino también para ella misma.

Podemos añadir una característica más a la lista anterior: una explicación plenamente satisfactoria de la materia oscura no consiste solo en decir «la materia oscura está hecha de estas partículas», sino que hace falta explicar también por qué tiene la abundancia que tiene, es decir, un 27 % del contenido total del universo. Recordemos que, a partir del estudio de la nucleosíntesis primitiva se ha sabido explicar las abundancias de los elementos ligeros. Del mismo modo, si un tipo de partícula con determinadas características (masa e interacciones) es candidata a jugar el papel de materia oscura, se puede calcular con cuánta abundancia se produjo en el universo primitivo. Una candidata que se produzca con demasiada o demasiado poca abundancia es una candidata problemática e incluso descartable. Por consiguiente, el porcentaje de materia oscura en el universo es una pista crucial para identificar candidatos razonables a la misma.

Así que buscamos una partícula (o grupo de partículas) que se ajuste a las características anteriores. Pero además, disponemos de otros indicios que aún no hemos comentado y que añaden información valiosa a nuestro retrato robot de la materia oscura.

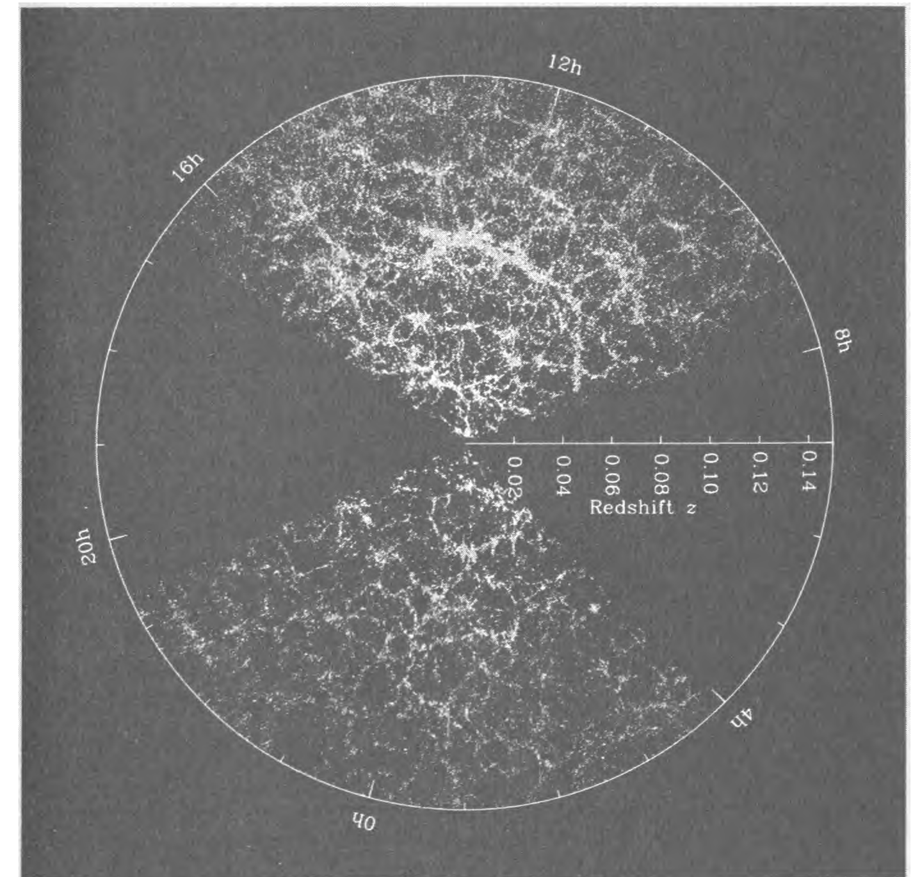
LA MATERIA OSCURA HA DE SER FRÍA

En el capítulo anterior dejamos el universo en el momento de la recombinación, cuando se formaron los primeros átomos. Vimos que en ese instante el universo era casi perfectamente homogéneo, excepto por pequeñas variaciones de densidad, originadas por las ondas sonoras que fluctuaban en el espacio primitivo, y que fueron registradas en el mapa de temperaturas de la radiación de fondo (imagen de las págs. 78-79). ¿Qué ha pasado desde entonces?

Después de la recombinación, aquellas tenues inhomogeneidades siguieron evolucionando. Lo que sucedió es que las zonas del espacio que tenían más densidad atrajeron hacia ellas, por atracción gravitatoria, la materia de su entorno próximo. De este modo, estas zonas se hicieron cada vez más densas, proceso que continuó durante los 13 800 millones de años transcurridos desde entonces. El resultado final es el universo actual. ¿Y qué aspecto ofrece nuestro universo? Las galaxias se distribuyen por el cosmos de una manera bastante heterogénea, con zonas de grandes acumulaciones entremezcladas con otras vacías (esto puede apreciarse en la imagen de la página contigua).

Hemos visto que la textura del universo en la época de la recombinación (la registrada en el mapa de temperaturas de la radiación de fondo) ha podido ser entendida, e incluso predicha, a partir de la teoría del Big Bang, lo que ha supuesto un gran éxito para la teoría, además de proporcionar información valiosa sobre el universo. De un modo parecido, podemos preguntamos si es posible entender la textura actual del universo de forma teórica. En concreto, los astrofísicos se plantearon la tarea de entender teóricamente la evolución de las inhomogeneidades primitivas desde la época de la recombinación hasta nuestros días.

EL ASPECTO DEL UNIVERSO
La imagen corresponde a uno de los mapas de galaxias más completos disponibles en la actualidad, el SDSS. Los dos sectores representados son dos «rebanadas planas» del universo, como dos gigantescos trozos de tarta, en cuyo vértice se encuentra la Tierra. Cada punto luminoso del mapa simboliza una galaxia (hay representadas un millón, aproximadamente). La circunferencia exterior de la figura, donde se sitúan las galaxias más lejanas representadas, se encuentra a una distancia de 2000 millones de años-luz de la Tierra. Se observa que la distribución de galaxias no es uniforme, sino que presenta una textura «filamentosa»: hay zonas ricas en galaxias y cúmulos de galaxias (más brillantes), entremezcladas con otras muy vacías (oscuras).



La materia oscura ha jugado un papel esencial en el proceso de agrupación progresiva de la materia, ya que es el principal ingrediente de la misma. Pero no solo la abundancia de la materia oscura es importante, también lo es la velocidad con que se mueven las partículas que la componen. Si esa velocidad fuera muy grande (lo que se denomina «materia oscura caliente»), el proceso de agrupamiento de la materia habría sido mucho menos eficiente. La razón es que las veloces partículas de la materia oscura habrían escapado con facilidad a los efectos gravitatorios y no se acumularían con la misma eficacia. Por tanto, necesitamos «materia oscura fría», que desde el principio pueda agruparse por efecto de su propia gravedad. Esta importante característica permite descartar muchos candidatos a materia oscura.

La *energía* oscura también juega un papel importante en el proceso de agrupamiento de la materia. Como se ha mencionado (y veremos con detalle en el próximo capítulo), la energía oscura produce un efecto de expansión acelerada del universo y, por lo tanto, supone un factor en contra del agrupamiento de la materia.

Todos estos factores hay que tenerlos en cuenta a la hora de calcular teóricamente la evolución de la materia a lo largo de los 13 800 millones de años transcurridos desde la época de la recombinación. Se trata de un cálculo complicado, que solo es posible realizar con la ayuda de superordenadores. En la imagen de las págs. 102-103 vemos el resultado de una simulación de este tipo para un fragmento del universo.

La materia oscura aparece, efectivamente, agrupada de forma «filamentosa», como un amasijo de telarañas. En las zonas de más alta densidad, representadas como más luminosas, estarían insertadas las galaxias y los cúmulos de galaxias. Esta textura, obtenida teóricamente, concuerda muy bien con la que realmente se observa (imagen de la pág. 99), siempre que se parta de las siguientes hipótesis:

— La densidad de materia oscura del universo es aproximadamente un 27% de la densidad crítica. Esto coincide, dentro de los errores teóricos y experimentales, con la abundancia de materia oscura determinada por otros métodos, comentados en páginas anteriores.

— La materia oscura es fría. Esto significa que, al comienzo del proceso de agrupamiento, la velocidad de las «partículas oscuras» no podía ser demasiado próxima a la velocidad de la luz.

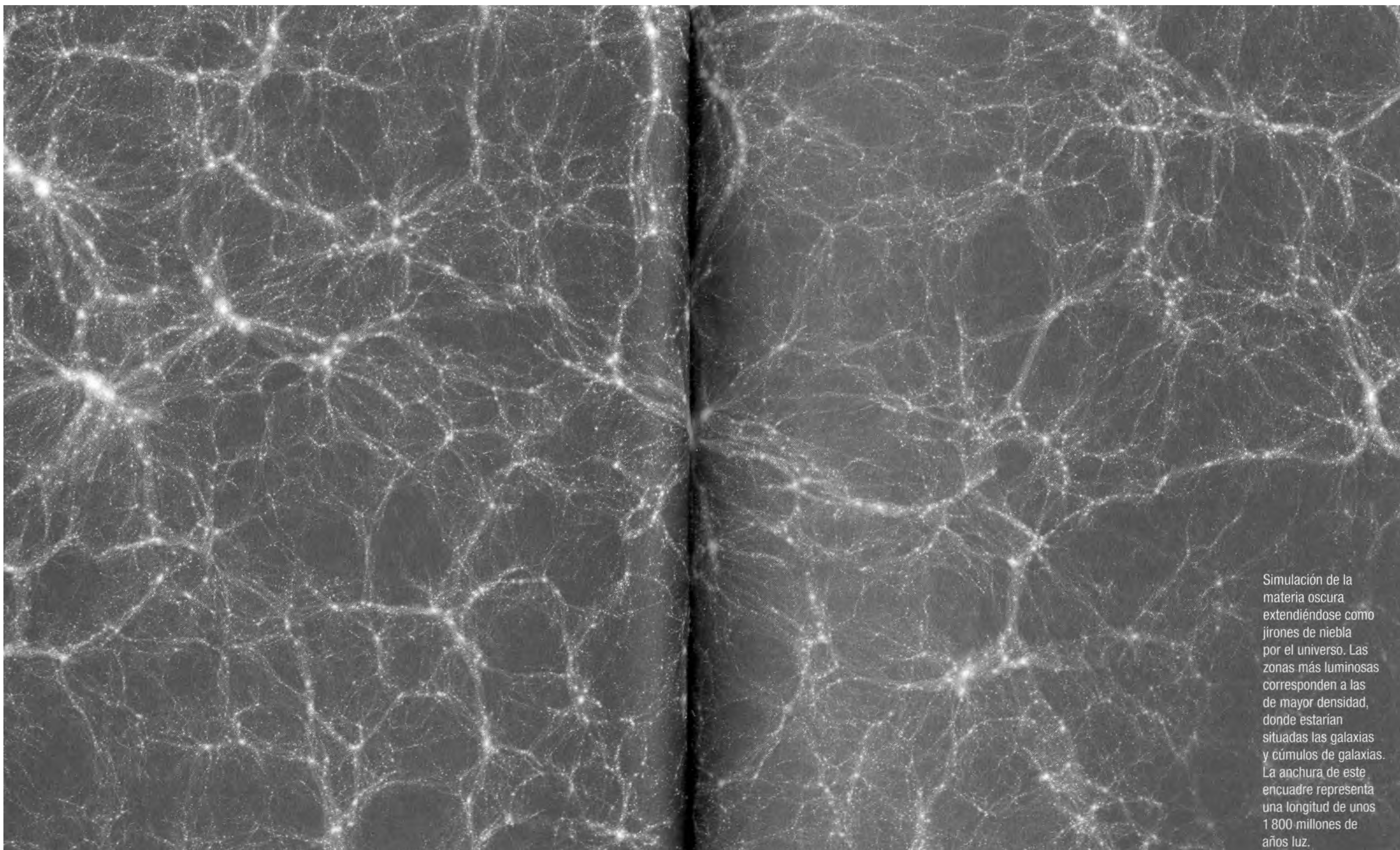
— Hay una gran contribución de la energía oscura al contenido total del universo, lo que ha supuesto un factor de crecimiento del tamaño de las galaxias y de los espacios entre ellas en los últimos miles de millones de años.

Así que la estructura a gran escala del universo actual nos confirma, una vez más, la existencia de la materia oscura (e incluso de la energía oscura) y nos da pistas sobre su naturaleza: ha de ser «fría». Esto completa, hasta donde sabemos, nuestro retrato robot de la materia oscura.

En las páginas siguientes vamos a discutir posibles candidatos a materia oscura, es decir, partículas reales o hipotéticas que satisfacen el perfil que hemos dibujado.

LA MATERIA ORDINARIA Y SUS MISTERIOS

A lo largo del libro hemos mencionado repetidas veces que la materia oscura no puede ser materia ordinaria. Esto parece envolver a la materia oscura en un halo de misterio especial, ya que ha de tratarse algo diferente a todo lo conocido, y así es, efectivamente. Sin embargo, esta perspectiva puede sugerir que la materia ordinaria es algo aburrido, de sobra conocido y sin interés. A esta percepción puede contribuir el propio nombre de «materia ordinaria». Sin embargo, la realidad es muy distinta. Es cierto que conocemos bien la materia ordinaria, y que disponemos de una teoría, llamada *modelo estándar*, que describe y predice su comportamiento de forma excelente, pero eso no quiere decir



Simulación de la materia oscura extendiéndose como jirones de niebla por el universo. Las zonas más luminosas corresponden a las de mayor densidad, donde estarían situadas las galaxias y cúmulos de galaxias. La anchura de este encuadre representa una longitud de unos 1 800 millones de años luz.

que la materia ordinaria no sea fascinante y misteriosa; de hecho presenta peculiaridades intrigantes, cuyo origen no conocemos. Como veremos, es posible que la propia existencia de la materia oscura esté relacionada con alguno de los enigmas sin resolver de la materia ordinaria.

Hablemos un poco de las características de la materia ordinaria y la teoría que las describe (el mencionado modelo estándar). Para empezar, hay que decir que la materia ordinaria es algo más que protones, neutrones y electrones, es decir, los constituyentes de los átomos. De hecho, los protones y neutrones ni siquiera son partículas elementales, sino compuestas de otras llamadas *quarks*. Un protón (p) está hecho de tres quarks, dos del tipo llamado u y uno del tipo llamado d; simbólicamente, $p = uud$. Del mismo modo, un neutrón (n) está compuesto por tres quarks en la combinación opuesta: $n = udd$. Por lo que sabemos, los quarks son perfectamente elementales, y lo mismo puede decirse del electrón. Así que, al final, resulta que los átomos siguen estando formados por tres partículas elementales: los quarks u y d (que constituyen los protones y neutrones) y los electrones. Es importante señalar que el protón y el neutrón no son las únicas partículas compuestas. De hecho, la mayoría de las partículas conocidas no son realmente elementales sino que están hechas de quarks. Entre ellas podemos mencionar el pión (o partícula π), el kaón (o partícula K), las partículas Λ, Δ, Σ, etc. Sin embargo, hay otras partículas que sí tienen el rango de partículas elementales, en pie de igualdad con el electrón y los quarks.

En capítulos anteriores hemos mencionado los *neutrinos*, representados por la letra griega ν. La existencia de estas partículas fue predicha en 1930 por el gran físico Wolfgang Pauli a partir del estudio de las desintegraciones de ciertos núcleos, si bien para su descubrimiento hubo que esperar hasta 1956. Por lo que sabemos, los neutrinos son partículas tan elementales como los quarks y los electrones. Así que el electrón (e), junto con los quarks (u y d) y el neutrino (ν) forman un selecto grupo, llamado *primera familia de partículas elementales*, o *familia del electrón*:

$$\begin{pmatrix} \nu_e & u \\ e & d \end{pmatrix}$$

El subíndice «e» en el neutrino indica que en sus interacciones aparece siempre asociado al electrón. Pero aquí no acaba la lista. Conocemos otras dos familias de partículas elementales, también llamadas familia del *muón* (μ) y del *tau* (τ). El muón y el tau son dos partículas prácticamente iguales en todo al electrón, excepto que su masa es mayor. Concretamente el muón es unas 200 veces más pesado que el electrón, y el tau, unas 3500. Son tan parecidos que cada uno tiene su propia familia de partículas, similar a la del electrón, con su propio neutrino (ν_μ para el muón y ν_τ para el tau) y sus parejas de quarks (c y s para el muón, t y b para el tau):

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu & c \\ \mu & s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau & t \\ \tau & b \end{pmatrix}$$

Esta lista de partículas de materia es un ingrediente básico del modelo estándar. Ciertamente, todos los objetos y sustancias familiares están hechos de átomos, a su vez formados por partículas de la primera familia. Las partículas de las otras dos familias son mucho menos abundantes: solo pueden observarse en los rayos cósmicos (algunas de ellas) o ser producidas en los colisionadores de partículas. Sin embargo, aunque podríamos «prescindir de ellas» para nuestra existencia, conceptualmente son tan fundamentales como las de la primera familia.

Podría pensarse que la secuencia de familias anterior continúa indefinidamente, es decir que habrá una cuarta familia, una quinta, etc., solo que aún no se han descubierto. Pero no es así. Existen pruebas convincentes de que solo hay tres familias. Si hubiera una cuarta, se tendría que haber descubierto ya, o bien tendría que ser tan diferente a las otras tres que realmente no se podría llamar cuarta familia. Desde luego, aquí surgen muchas preguntas fascinantes: ¿Por qué las partículas elementales se presentan

en tres familias? ¿Por qué hay una jerarquía de masas entre ellas: las partículas de la tercera familia son más pesadas que las de la segunda, y estas más que las de la primera? A día de hoy estos misterios no han sido resueltos, y suponen uno de los grandes temas de investigación en física teórica. De lo que no cabe duda es de que este misterio (y otros) indican claramente que nuestra comprensión de la física de partículas es aún incompleta.

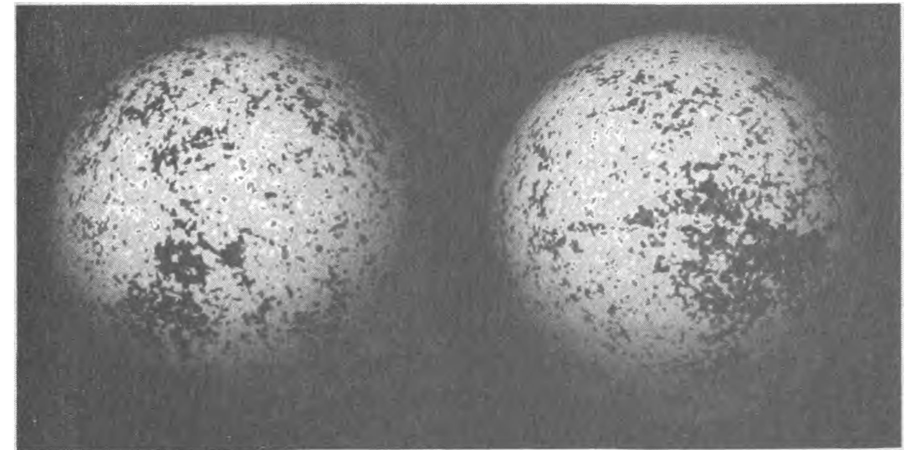
Hablemos ahora de otro ingrediente básico del modelo estándar: las *interacciones* entre las partículas elementales. Uno de los éxitos de la ciencia moderna ha sido comprender que todas las interacciones que vemos entre objetos y sustancias (atracción gravitatoria, fuerzas eléctricas y magnéticas, fuerzas de rozamiento y adherencia, reacciones químicas, procesos nucleares en el interior de las estrellas, etc.) son manifestaciones de solo cuatro interacciones fundamentales: la gravitatoria, la electromagnética, la fuerte y la débil. Por ejemplo, todas las reacciones químicas son manifestaciones de la interacción electromagnética. Es interesante mencionar que las cuatro interacciones son esenciales para la vida. Sin atracción gravitatoria no se formarían estrellas ni planetas, ni los segundos orbitarían alrededor de las primeras. Sin fuerzas electromagnéticas los electrones no estarían ligados a los núcleos atómicos, así que no habría átomos ni, por tanto, sustancias diversas. Las fuerzas fuertes y débiles son mucho menos familiares, pero igualmente esenciales. La fuerzas fuertes son las responsables de que los quarks se mantengan unidos en un protón o un neutrón, y también de que los protones y neutrones formen núcleos estables. Sin ellas no existirían los núcleos atómicos y, por tanto, tampoco los átomos. Finalmente, las fuerzas débiles son las responsables de los procesos que en el interior del Sol producen luz y calor, los cuales hacen posible la existencia de vida en la Tierra. Las doce partículas elementales de las tres familias sienten estas interacciones de forma diferente. La interacción gravitatoria es sentida por todas ellas, así como la interacción débil. La electromagnética es sentida solo por las partículas con carga eléctrica, que son todas excepto los neutrinos. Por último, la interacción fuerte es sentida solo por los quarks.

LAS SEMILLAS DE LAS GALAXIAS

Si el universo primitivo hubiese sido *perfectamente* homogéneo, su evolución posterior no habría producido la agrupación de la materia en galaxias y cúmulos de galaxias que observamos hoy en día. Para que esta agrupación tenga lugar hace falta empezar con algunas inhomogeneidades, que actúan como «semillas», en torno a las cuales se va acumulando la materia. Los códigos de ordenador que simulan este proceso parten normalmente de la hipótesis de que las semillas iniciales fueron aquellas tenues inhomogeneidades del plasma primitivo en la época de la recombinación, cuando el universo tenía 380000 años, y que fueron registradas en el mapa de la radiación de fondo (véase la imagen). Y, efectivamente, cuando se parte de esta suposición, los códigos reproducen muy bien la «textura» del universo actual.

Más evidencias

Existe además una observación reciente que confirma la hipótesis de manera espectacular. Recordemos que el mapa de la radiación de fondo presenta un granulado característico, correspondiente a la longitud de onda del tono sonoro fundamental. Si la hipótesis es correcta, ese granulado tuvo que dejar su marca en la distribución de materia en el universo. Y se ha observado que las galaxias actuales tienden a acumularse en circunferencias con un radio de 480 millones de años-luz, que es precisamente aquella longitud característica inicial multiplicada por mil, debido a la expansión del universo desde la época de la recombinación hasta hoy. Esta es una prueba sensacional de que, en efecto, las fluctuaciones sonoras del plasma primitivo fueron las semillas que posteriormente dieron lugar a las galaxias y cúmulos de galaxias. ¡Somos los descendientes de aquellos ligeros temblores de la materia, registrados en el mapa de la radiación de fondo!



La imagen muestra el mapa de la radiación de fondo de microondas dividido en hemisferios.

En algunos aspectos, las cuatro interacciones son muy distintas entre sí. Por ejemplo, la intensidad de la fuerza gravitatoria es mucho menor que la de las otras tres. Pensemos que cuando un pequeño imán levanta un tornillo, está generando una fuerza magnética capaz de superar la fuerza gravitatoria ejercida sobre ese mismo tornillo por toda la Tierra. Sin embargo, las cuatro interacciones básicas presentan aspectos comunes importantes; concretamente, todas ellas están mediadas por ciertas partículas, que hacen el papel de mensajeras de la interacción. Por ejemplo, los fotones son las partículas mensajeras de la interacción electromagnética. Cuando dos electrones (de carga negativa) se repelen, esa repulsión surge del intercambio de fotones entre ellos, tal como ilustra la figura 1. La letra griega γ (gamma) simboliza el fotón intercambiado. Análogamente, la interacción fuerte surge del intercambio de los llamados *gluones* (g), y la interacción débil, de los llamados *bosones* W y Z. Finalmente, la interacción gravitatoria tiene también su partícula mensajera, el *gravitón* (G). Todas estas partículas mensajeras han de ser consideradas también partículas perfectamente elementales (hasta donde sabemos).

En resumen, tenemos doce partículas de materia elementales y cuatro tipos de interacciones, cada una de ellas mediada por su correspondiente partícula mensajera, tal como está recogido en la figura 2.

Un aspecto interesante de las partículas mensajeras de las interacciones es que, con la excepción de los bosones W y Z, todas ellas tienen masa cero. Este hecho puede explicarse a partir de la propia estructura matemática de las interacciones. La peculiaridad de que los bosones W y Z tengan masa se debe al llamado «mecanismo de Higgs», en el que no podemos extendernos; mencionemos solamente que una consecuencia de este mecanismo teórico es que debe existir una partícula adicional a las recogidas en la figura 2: el famoso *bosón de Higgs*, el cual fue descubierto en el CERN (Laboratorio Europeo de Partículas, cerca de la ciudad suiza de Ginebra) en 2012. Esto supuso un gran espaldarazo para la teoría, es decir para el modelo estándar de la física de partículas.

FIG. 1

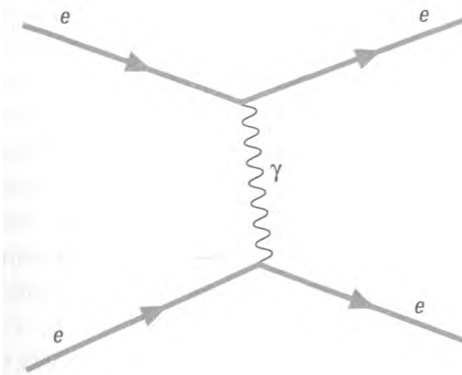


Diagrama que representa simbólicamente el proceso de repulsión de dos electrones, producido por el intercambio de fotones (γ).

FIG. 2

Materia			Interacciones	
1ª familia	2ª familia	3ª familia		
ν_e	ν_μ	ν_τ	γ	Electromagnética
e	μ	τ	W, Z	Débil
u	c	t	g	Fuerte
d	s	b	G	Gravitatoria

Sin embargo, el mecanismo de Higgs tiene aspectos insatisfactorios. Concretamente, no explica por sí mismo por qué las masas de los bosones W y Z son las que son (unas 90 y 100 veces más pesadas que un protón, respectivamente); de hecho, las ecuaciones teóricas sugieren que de forma natural esas masas deberían ser mucho mayores. Este problema se llama a veces en

la jerga científica el *problema de la naturalidad* o el *problema de la jerarquía*, pero no hay que confundirlo con la jerarquía de masas entre familias de partículas. Hay un consenso científico generalizado, pero no completo, en el sentido de que la resolución de este problema requiere la existencia de nueva física, con nuevas partículas que tengan masas no mucho mayores que las de los bosones *W* y *Z*. Hay muchos modelos teóricos de cuál podría ser esa nueva física (más adelante mencionaremos algunos), pero a día de hoy, a pesar de los esfuerzos realizados, ninguno de ellos ha sido comprobado experimentalmente. Se trata de un tema de enorme actualidad, desde el punto de vista tanto teórico como desde el experimental.

Consideremos ahora lo siguiente: sabemos que los quarks *u* y *d* forman los protones y neutrones, los cuales, junto con el electrón, constituyen los átomos de la materia ordinaria. Pero ¿qué pasa con las otras partículas de la tabla? ¿Podría ser alguna de ellas la responsable de la materia oscura? De entrada hay que decir que casi todas esas partículas son muy inestables. Por ejemplo, el muón se desintegra en dos millonésimas de segundo, y la vida del tau es aún más corta. Las partículas compuestas a partir de quarks de la segunda y tercera familias son asimismo tremendamente efímeras. Por tanto, estas partículas no sirven como materia oscura: no satisfacen nuestro retrato robot, que exige que la materia oscura sea muy estable. La excepción son los neutrinos, con los que merece la pena entretenerse un poco.

Los neutrinos son partículas fascinantes que ostentan varios «récords». Por ejemplo, son las partículas de materia más ligeras que se conocen; de hecho, no se sabe su masa, solo ciertos límites entre los que esta tiene que encontrarse. Concretamente, el neutrino más pesado ha de ser entre un millón y cien millones de veces más ligero que el electrón (la siguiente partícula más ligera). Son también las partículas conocidas más difíciles de detectar, ya que interaccionan muy poco con la materia, razón por la cual se tardó tanto en descubrirlas. Por cierto que ahora mismo usted está siendo atravesado, sin notarlo, por cientos de billones de neutrinos por segundo, la mayor parte provenientes del Sol.

> La ausencia de pruebas no es prueba de ausencia.
>
> Carl Sagan

Los neutrinos son también las partículas de materia más abundantes del universo, solo superadas en número por las partículas de luz, los fotones. La mayor parte de los neutrinos del universo provienen de los primeros instantes del Big Bang, y constituyen un «fondo de neutrinos» que llena el cosmos, semejante a la radiación de fondo (hecha de fotones) que discutimos en páginas precedentes. Debido a su baja energía, estos neutrinos cósmicos son tremendamente difíciles de detectar; de hecho, aún no se ha detectado ninguno, pero estamos muy seguros de que están ahí.

Todas estas características de los neutrinos parecen encajar «como anillo al dedo» en nuestro retrato robot de la materia oscura, y, de hecho, durante mucho tiempo los neutrinos fueron considerados un firme candidato para la misma. Sin embargo, los neutrinos no pueden ser la materia oscura, por dos razones. La primera es que, cuando se calcula el remanente de neutrinos cósmicos procedente del Big Bang, resulta que no es suficiente para constituir un 27% de la densidad crítica (que es la densidad de la materia oscura); para conseguirlo, deberían ser bastante más pesados de lo que son. La segunda razón es que los neutrinos supondrían un tipo de materia oscura «caliente», y, como sabemos, la materia oscura ha de ser fría. Así que, desgraciadamente, los neutrinos han quedado descartados para ejercer el papel de materia oscura. Mencionemos de paso que las peculiares propiedades de los neutrinos están perfectamente entendidas desde el punto de vista teórico, excepto la extrema pequeñez de sus masas. De hecho, existen modelos teóricos muy interesantes para entender esa pequeñez, y todos ellos requieren, una vez más, la existencia de nueva física y, en general, de nuevas partículas.

En los párrafos anteriores hemos resumido los ingredientes más importantes del modelo estándar de la física de partículas, la teoría que describe exitosamente toda la materia conocida. Aunque el modelo estándar funciona muy bien en la práctica, hemos visto que no es totalmente satisfactorio, ya que hay aspectos intrigantes de las partículas elementales que no es capaz

de explicar. Esto sugiere fuertemente que ha de haber física más allá del modelo estándar. Por otro lado, ninguna de las partículas descritas por esta teoría (las únicas conocidas) puede ejercer el papel de materia oscura. Así que la materia oscura también requiere la existencia de física más allá del modelo estándar.

ALGUNOS CANDIDATOS A MATERIA OSCURA

Cuando los físicos teóricos trabajan sobre posibles candidatos a materia oscura existen dos estrategias posibles. La primera es considerar una partícula hipotética, llamémosla X, que satisfaga todos los requisitos de nuestro retrato robot. Como hemos dicho antes, el retrato robot no es demasiado preciso, por lo que las características de la partícula X pueden variar dentro de grandes rangos. Por ejemplo, la masa de X podría ser extremadamente pequeña, mucho más aún que la masa de los neutrinos, pero también podría ser mucho más grande que la de todas las partículas elementales conocidas. Sin embargo, la libertad no es total. La razón es que necesitamos que la materia oscura se produzca en el universo primitivo con la abundancia observada (27% de la densidad crítica), y ese hecho depende crucialmente de las interacciones de la partícula de materia oscura con la materia ordinaria. En concreto, en el universo primitivo las partículas X debieron de aniquilarse con sus antipartículas en una proporción adecuada, de forma que las que quedaron sin aniquilar serían ahora las responsables de la abundancia de materia oscura observada. Si las interacciones de X fueran demasiado grandes, la aniquilación inicial habría sido demasiado eficiente, por lo que habría quedado un remanente de materia oscura inferior al que se observa. Y viceversa: si las interacciones fueran demasiado débiles, la materia oscura apenas se habría aniquilado al comienzo del universo y actualmente sería demasiado abundante. Por otro lado, la cantidad exacta de interacción que se precisa para reproducir la abundancia de materia oscura observada depende del valor de la masa de X. Por tanto, aunque no sabemos la masa de X ni la intensidad ni el tipo de sus interacciones con la materia ordinaria, estas no pueden ser cualesquiera, sino que han de estar en un delicado equilibrio. Este conocimiento permite realizar predicciones acerca de las posibilidades de detectar las partículas de materia oscura en un experimento adecuado, o incluso de producirlas en los colisionadores de partículas, asuntos sobre los que enseguida volveremos.

La estrategia anterior podría ser calificada de «sin prejuicios», ya que en ella no se prejuzga cuál es la partícula X, solo se pretende determinar el rango posible de sus propiedades para intentar «acorralarla» experimentalmente y, si somos afortunados, poder detectarla. Es una estrategia inteligente, si bien tiene el problema de que nos da muy pocas pistas de qué tipo de partícula es más probable que sea X. Pensemos que, a pesar de los delicados equilibrios que se necesitan entre la masa de X y sus interacciones, los rangos para estas son inmensos. Sin tener una idea más concreta sobre las propiedades de las partículas X, es difícil diseñar experimentos eficaces para detectarlas. Es como buscar una aguja en un pajar, sin saber el tamaño ni el color de la aguja. Por eso, una estrategia complementaria es considerar candidatos a materia oscura especialmente motivados por consideraciones teóricas.

Como vimos en el apartado anterior, hay razones para pensar que el modelo estándar de la física de partículas no es la teoría última, sino que debe de haber nueva física aún por descubrir que resuelva algunos de sus enigmas, por ejemplo, la jerarquía de masas entre las familias de partículas o el problema de la naturalidad asociado al mecanismo de Higgs. Los modelos teóricos desarrollados para intentar explicar estos enigmas suelen implicar la existencia de nuevas partículas. Si sucede que, sin habérselo propuesto, alguna de esas partículas tiene las propiedades adecuadas para ejercer de materia oscura, entonces será un candidato excelente para la misma. Esto será especialmente cierto si el modelo teórico del que surge está bien fundamentado. De esta manera, los modelos teóricos de nueva física pueden sugerimos características concretas de la partícula X, sirviéndonos de guía sobre lo que debemos buscar. Esto hace la búsqueda potencialmente más eficiente, pero no hay que olvidar que esos

modelos de nueva física contienen prejuicios teóricos y de hecho podrían ser erróneos, por muy brillantes que sean. Por ello, lo más sensato es seguir las dos estrategias a la vez: la estrategia «sin prejuicios» y la estrategia «con prejuicios teóricos», ya que son complementarias entre sí.

A continuación comentaremos brevemente algunos de los candidatos teóricos a materia oscura que están siendo considerados más seriamente por la comunidad científica.

Los WIMPs

Los cálculos teóricos indican que si una partícula tiene una masa entre 10 veces y 1000 veces la masa de un protón, aproximadamente, y presenta solo interacciones débiles (una de las cuatro interacciones fundamentales anteriormente comentadas), entonces la abundancia con la que se habría producido en el universo primitivo estaría de acuerdo con la abundancia de materia oscura que observamos. En otras palabras, una partícula así es una candidata perfecta para ser la partícula X que constituye la materia oscura. A las partículas con estas características se les denomina WIMPs, acrónimo inglés de *Weakly Interacting Massive Particle*, o sea «partícula masiva con interacción débil». Los WIMPs son los candidatos más estudiados hasta la fecha para la materia oscura, tanto desde el punto de vista teórico como desde el experimental. La razón es que el problema de la naturalidad del modelo estándar, comentado en el apartado anterior, sugiere precisamente la existencia de este tipo de partículas.

En este último sentido, una de las teorías más estudiadas para resolver el problema de la naturalidad es la llamada *supersimetría*. Esta consiste en la hipótesis de que las ecuaciones de la física han de modificarse de forma que sean invariantes bajo ciertas transformaciones matemáticas. Esto parece algo muy abstracto, pero, de hecho, el modelo estándar presenta un gran número de simetrías, o sea, de invariancias matemáticas. Esas simetrías permiten entender de forma elegante muchas propiedades de la materia ordinaria, por ejemplo, el hecho notable de que las cuatro interacciones básicas surjan del intercambio de partículas mensajeras. Sin embargo, entre las simetrías del modelo estándar *no* está la supersimetría. Para que el modelo estándar sea supersimétrico hace falta modificarlo, incluyendo nuevas partículas. Concretamente, cada partícula de las ya conocidas debe tener asociada otra, su «compañera supersimétrica». Técnicamente, cada compañera supersimétrica tiene las mismas propiedades que la partícula ordinaria a la que está asociada, excepto que su *espín* (su giro intrínseco) es diferente. Por ejemplo, al electrón (partícula de espín 1/2 en ciertas unidades) le corresponde el llamado s-electrón (partícula con la misma carga eléctrica que el electrón pero de espín cero).

La supersimetría, además de tener ciertas propiedades teóricas muy atractivas, permite resolver de forma elegante el problema de la naturalidad. Para ello, es necesario que las partículas supersimétricas tengan una masa del orden de cientos (como mucho miles) de veces la masa de un protón. Este hecho ha provocado un gran interés teórico y experimental por la supersimetría desde la década de 1980. Pero, además, resulta que en la mayoría de los modelos la partícula supersimétrica más ligera es el denominado neutralino (no confundir con «neutrino»), el cual, sin haberlo buscado así, posee las características perfectas de un WIMP: es estable, no tiene carga eléctrica, sus interacciones son solo de tipo débil, su masa está en el rango adecuado para que se produzca con la abundancia necesaria y da lugar a materia oscura fría. Podría ser que la partícula X fuera un neutralino.

Otra propuesta de física más allá del modelo estándar son los modelos con dimensiones espaciales extras. En este caso la hipótesis es que, además de las tres dimensiones espaciales habituales, largo, ancho y alto, existen una o varias dimensiones espaciales, invisibles para nuestros ojos porque tienen un tamaño muy pequeño. Para comprenderlo, pensemos en la superficie de una tubería. Tiene dos dimensiones: una a lo largo, que se extiende indefinidamente, y otra transversal, que no es más que una pequeña circunferencia. Si imaginamos una tubería tan delgada que la circunferencia se hace microscópica, nos parecerá simplemente una

línea, de una sola dimensión («largo»); la dimensión transversal se habrá vuelto invisible. Del mismo modo, dimensiones compactas muy pequeñas podrían pasar desapercibidas en nuestro mundo de tres dimensiones extendidas. Sin embargo, esas dimensiones extras tendrían consecuencias: una partícula moviéndose en ellas (y no en las tres dimensiones convencionales) nos parecería que está en reposo, pero con mucha energía; es decir, nos parecería que tiene masa y, por tanto, una partícula distinta Precisamente una de esas partículas podría tener las características de un WIMP y ser la responsable de la materia oscura.

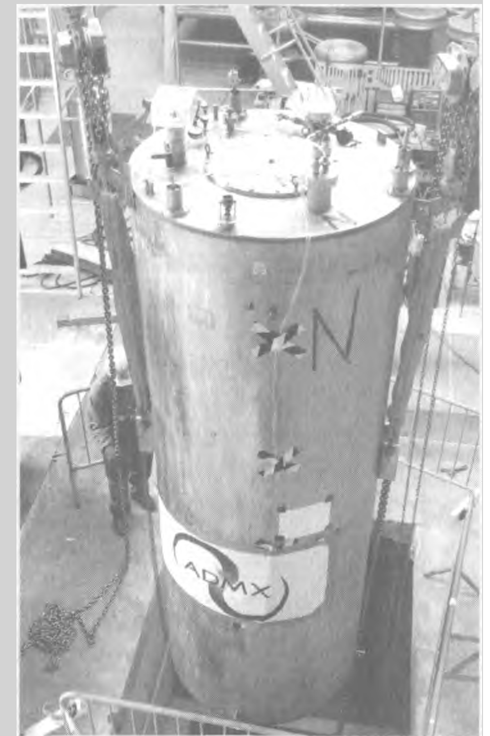
La presencia de dimensiones extras, así como de la supersimetría, es muy habitual en modelos de física más allá del modelo estándar, concretamente en las teorías de supercuerdas. Estas teorías fueron propuestas para resolver un problema grave del modelo estándar: la falta de consistencia matemática de las fuerzas gravitatorias a nivel cuántico, y suponen el intento más serio hasta la fecha en esa dirección.

Además de la supersimetría, existen otros modelos teóricos que podrían solucionar el problema de la naturalidad del modelo estándar, y que también dan lugar a WIMPs. Entre ellos están los modelos de Higgs compuestos, modelos de Higgs múltiples, etcétera.

Los axiones

Los axiones son partículas propuestas en la década de 1980 para resolver un problema teórico del modelo estándar relacionado con la estructura de las interacciones fuertes. No podemos entrar aquí en los detalles técnicos de dicho problema, ni en la forma en la que los axiones lo solucionan, pero es interesante mencionar que los axiones, sin haber sido «diseñados» teóricamente para ello, son partículas que se ajustan perfectamente al retrato robot de la materia oscura. Se trata de partículas muy estables, de masa muy pequeña (más ligeras incluso que los neutrinos) y que se produjeron copiosamente (en caso de existir) en el universo primitivo. Sus interacciones con la materia ordinaria

UN DETECTOR DE AXIONES



Si la materia oscura está hecha de axiones, su detección requerirá métodos experimentales peculiares. Hay que tener en cuenta que, en caso de existir, los axiones son partículas extraordinariamente ligeras (del orden de 10000 millones de veces más ligeras que los electrones) y con una interacción extraordinariamente débil. Son, por tanto, objetos enormemente escurridizos. Una ventaja es que, si constituyen la materia oscura, se han de encontrar a nuestro alrededor en cantidades fabulosas: unos 10000 billones de axiones por litro. Una de sus interacciones más características es con los fotones, las partículas de luz.
Un axión tiene la propiedad de que, al interaccionar con un campo magnético intenso, puede transmutarse en un fotón.
Dada la masa del axión, el fotón creado correspondería a una radiación de microondas, semejante a la de un horno de microondas doméstico, o a las ondas electromagnéticas que emiten y reciben los teléfonos móviles. Siguiendo estos principios se ha construido un detector de axiones, llamado ADMX *(Axion Dark-Matter Experiment),* instalado en la universidad de Washington. Consta de una cavidad cilindrica, sometida a un campo magnético intensísimo. Si dentro de la cavidad un axión de materia oscura se transmuta en un fotón, este último entra en resonancia con la cavidad, de un modo semejante a una nota musical que resuena dentro de un tubo de órgano. La señal producida es terriblemente débil: menos de una billonésima de billonésima de vatio (compárese con la potencia de unos 10 vatios con la que emite una bombilla ordinaria). Para que esa señal sea detectable, es necesario que no exista ruido térmico de fondo. Por ello, el experimento ha de encontrarse a bajísimas temperaturas, apenas dos grados por encima del cero absoluto. Además, se necesita un detector de microondas extremadamente sensible. De hecho, el detector instalado es el más sensible del mundo: si lo utilizásemos para recibir comunicaciones en nuestro móvil, ¡tendríamos buena cobertura aunque nos alejáramos hasta el planeta Jupiter! Todo el dispositivo tiene unos cuatro metros de largo (véase la fotografía). Si la materia oscura está hecha de axiones, existe una gran expectativa de que este experimento pueda detectarlos en los próximos años.

son extraordinariamente débiles, por lo que los métodos de detección directa adecuados para detectar WIMPs no sirven para detectar axiones.

Otros candidatos

Desde que se hizo evidente que la materia oscura debía tener una naturaleza distinta de la ordinaria, se han desarrollado muchos escenarios teóricos de física más allá del modelo estándar con partículas candidatas a constituir la materia oscura. Por ello existe una gran proliferación de propuestas más o menos exóticas y nombres peculiares: neutrinos estériles, módulos, dobletes inertes, etc. Sin embargo, en muchos casos estas propuestas no tienen una sustentación firme adicional, sino que son modelos ad hoc, diseñados ex profeso para acomodar la materia oscura.

LA CAZA DE LA MATERIA OSCURA

Existen decenas de experimentos en todo el mundo con el objetivo de detectar señales de la materia oscura, lo que sin duda refleja el enorme interés científico que suscita este tema. Aunque las técnicas usadas para ello son muy diversas, fundamentalmente se siguen tres tipos de estrategias complementarias entre sí: la detección directa, la detección indirecta y la producción de materia oscura.

Detección directa

Actualmente se tiene una idea bastante precisa de la densidad de materia oscura que existe en nuestra región de la Vía Láctea: aproximadamente media milmillonésima de gramo por kilómetro cúbico, lo que equivale a la masa de 300 protones por litro. Esto se calcula a partir del movimiento de las estrellas alrededor del centro galáctico, como describimos en el capítulo 1. Usando ese valor de la densidad, se puede calcular fácilmente cuántas partículas de materia oscura (a las que hemos llamado X) hay a nuestro alrededor. Por ejemplo, si la partícula X fuera 100 veces más pesada que un protón (que sería el caso de un WIMP típico), entonces tendríamos unas tres partículas de materia oscura por litro, por ejemplo en cada botella de leche de su nevera. Pero esas partículas se mueven a gran velocidad. Teniendo en cuenta que la materia oscura de la galaxia se halla en equilibrio gravitatorio, es posible deducir su velocidad promedio: unos 300 km/s. A partir de estos dos datos, la densidad y la velocidad, se puede determinar el flujo de partículas de materia oscura en el que estamos inmersos. Siguiendo con el ejemplo del WIMP 100 veces más pesado que un protón, el resultado es que un centímetro cuadrado de cualquier superficie (incluida su piel) está siendo atravesado por cien mil partículas de materia oscura por segundo.

> El éxito es la capacidad de ir de fracaso en fracaso sin perder el entusiasmo.
>
> WINSTON CHURCHILL

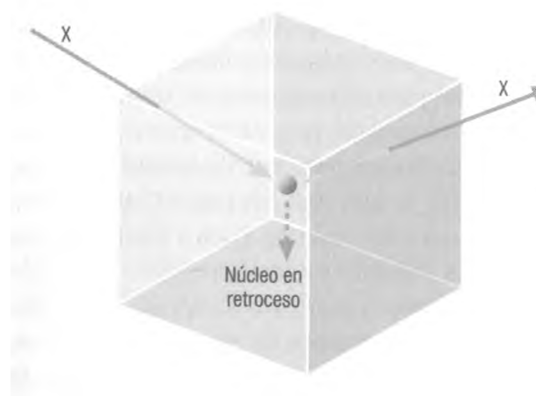
Aunque sabemos que la interacción de la materia oscura con la materia ordinaria (de la que estamos hechos nosotros y nuestros instrumentos de observación) es muy pequeña, el flujo de partículas de materia oscura es lo suficientemente intenso para que tenga sentido intentar detectarlas con experimentos apropiados. Es importante tener en mente que, dado que estas partículas X interaccionan tan poco, atraviesan la Tierra sin ningún esfuerzo. Por ello, en cualquier lugar que instalemos el experimento de detección tendremos «garantizado» un flujo importante de partículas de materia oscura, que llegarán desde todas las direcciones, incluyendo «desde abajo».

¿Cómo es un experimento típico de detección directa de materia oscura? En primer lugar se necesita una sustancia que, potencialmente, pueda interaccionar con las partículas X de materia oscura que pululan en nuestro entorno. Si esas partículas fueran WIMPs, serían sensibles a la fuerza débil y, por tanto, tendrían una cierta probabilidad de interaccionar con la materia ordinaria y, concretamente, con los núcleos atómicos. (La interacción

entre las partículas de materia oscura y los núcleos atómicos puede estar también mediada por el intercambio de bosones de Higgs. Este es un aspecto bastante técnico, pero importante en los cálculos teóricos.) Esto nos da una oportunidad de detección, siempre que seamos capaces de observar de alguna forma cómo un núcleo atómico de la muestra de sustancia «siente el impacto» de una partícula de materia oscura. Esto está ilustrado en la figura 3, donde vemos cómo una partícula X de materia oscura impacta con uno de esos núcleos atómicos, haciendo que este retroceda.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que continuamente estamos siendo bombardeados por partículas *ordinarias*, provenientes de distintas fuentes; por ejemplo, estamos recibiendo constantemente el impacto de los rayos cósmicos. Además, las sustancias radiactivas de nuestro entorno, aunque se encuentren en pequeñas cantidades, son también una fuente importante de partículas que nos bombardean; de hecho, nuestros propios cuerpos emiten partículas de diversos tipos. Por tanto, lo primero que hay que hacer es proteger el experimento del impacto de todas esas partículas «indeseables». De otro modo sería imposible distinguir el impacto de una partícula X (en el caso de que realmente tenga lugar) entre los millones de impactos de partículas ordinarias. Por ello, estos experimentos se suelen situar dentro de una mina o debajo de una montaña, con objeto de resguardarlos de los rayos cósmicos. Para proteger la muestra de materia utilizada de la radiación emitida por las rocas o los objetos del laboratorio, esta se sitúa dentro de un robusto blindaje que no sea radiactivo en absoluto, por ejemplo, hecho de «plomo arqueológico», es decir, plomo fundido en tiempo de los romanos (y sin valor histórico alguno), ya que después de 2 000 años ha perdido toda su radiactividad. Este es, de hecho, el montaje realizado en el experimento ANAIS, un proyecto español de detección de materia oscura (y no es el único), situado dentro del túnel de Canfranc, en el Pirineo aragonés. Aun así, algunas partículas ordinarias, por ejemplo, los neutrinos, penetran hasta la muestra de sustancia blindada y pueden interaccionar con ella, lo que exige tener un control preciso de ese «ruido de fondo» inevitable, para poder descontarlo de los resultados que se observen.

FIG. 3



En un suceso de detección directa, una partícula de materia oscura (X), chocaría con un núcleo atómico, produciendo un retroceso de este último, que podría ser registrado con instrumentación adecuada.

Otro aspecto interesante de los experimentos es el método usado para registrar el retroceso del núcleo atómico, que se produce como consecuencia del impacto que sufre (véase la figura 3). Hay dos técnicas básicas. La primera (habitual cuando la muestra de sustancia es algún tipo de cristal, como germanio) es medir el pequeñísimo incremento de la temperatura del material, el cual ha de mantenerse a muy baja temperatura. La segunda (utilizada cuando la sustancia es un gas noble, como xenón) consiste en detectar el ligerísimo centelleo que se produce. En cualquier caso, son técnicas que requieren una tecnología punta y un control extraordinario de todas las variables físicas.

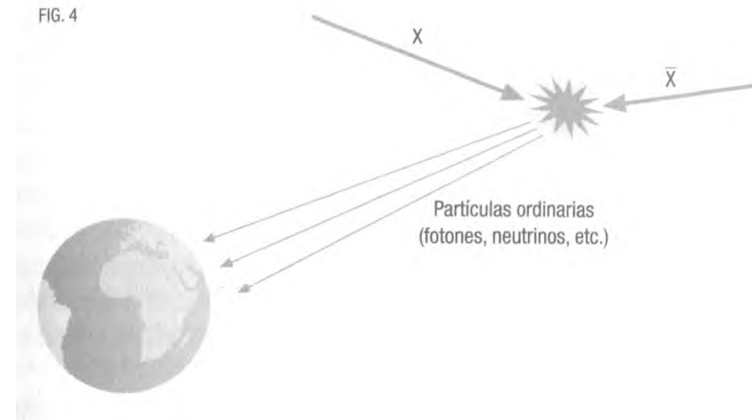
En los experimentos típicos, las muestras de sustancia utilizadas pueden contener desde unos pocos kilos hasta cientos de ellos. Está ya programado un experimento, llamado XENON1T, que funcionará debajo del macizo rocoso de Gran Sasso, en los Apeninos, y que empleará una tonelada de gas xenón. Naturalmente, cuanta más sustancia se utilice, más probabilidades hay de observar el impacto de una partícula de materia oscura, pero la complejidad y el precio del experimento también crecen.

Hay que decir que, a pesar de todos los esfuerzos realizados, hasta el momento no se ha encontrado ninguna señal clara de materia oscura en ningún experimento. Algunas de las colaboraciones científicas sostienen que sí han detectado señales, pero los datos son demasiado ambiguos todavía para ser tomados muy en serio. Aun así, los experimentos de detección directa han proporcionado información valiosísima acerca de la materia oscura. Ciertamente no han revelado lo que son las partículas X, pero han descartado grandes rangos de valores para su masa y sus interacciones, haciendo más definido su «retrato robot». De este modo, muchos candidatos teóricos han podido ser descartados, puesto que, si fueran los constituyentes de la materia oscura, habrían sido ya detectados. En este sentido hay que decir que la mayoría de los experimentos de detección directa, en proyecto o en funcionamiento, son especialmente adecuados para detectar (y, por tanto, también para descartar) partículas de tipo WIMP. De hecho, una parte importante del rango de parámetros de los WIMPs ha sido ya explorada y se espera que en los próximos años se explore casi la totalidad. Por tanto, si la materia oscura está hecha de WIMPs (por ejemplo, de tipo supersimétrico), existe una probabilidad importante de que sea detectada en un futuro cercano, lo que supondría un descubrimiento histórico.

Por supuesto, los detectores no tienen prejuicios acerca de la naturaleza de las partículas de materia oscura: las partículas X podrían no ser WIMPs, y aun así ser detectadas en alguno de los experimentos. Pero lo cierto es que otros candidatos a materia oscura, por ejemplo los axiones, son más difíciles de detectar con ellos.

Detección indirecta

Dependiendo de las características de la materia oscura, existe una cierta probabilidad de que algunas de sus partículas, X, que viajan por el espacio, choquen con sus antipartículas, X (que también forman parte de la materia oscura), aniquilándose. En ese proceso pueden producirse partículas ordinarias, como foto-



En el método de detección indirecta, lo que se registra son las partículas ordinarias que se producirían por la aniquilación de partículas de materia oscura (X) con sus antipartículas en alguna zona de la galaxia. Si la densidad de materia oscura es grande, como sucede en el centro de la Vía Láctea, pueden producirse grandes cantidades de partículas ordinarias, algunas de las cuales viajan hasta la Tierra, donde podrían ser detectadas.

nes, neutrinos, etc. Y esas partículas ordinarias pueden alcanzar la Tierra, tal como ilustra la figura 4.

El reto es deducir, a partir de la detección de esas partículas ordinarias, la existencia y propiedades de las partículas X de materia oscura que las originaron. Naturalmente, este proceso de aniquilación de la materia oscura es más fácil que se produzca en zonas donde la densidad de partículas X es mayor. En ese sentido, la región más propicia es el centro de la Vía Láctea, pero también son interesantes el resto del halo galáctico, las galaxias-satélite enanas que hay alrededor de la Vía Láctea y las galaxias vecinas, como Andrómeda. Otro lugar a considerar es el centro del Sol, donde se ha podido acumular con el tiempo una cierta cantidad de partículas de materia oscura que han caído en su campo gravitatorio. En la aniquilación de la materia oscura es probable que se produzcan partículas ordinarias de muy diversos tipos, aunque las que no son estables (por ejemplo los muones) se desintegran rápidamente. Al final lo que se genera es un flujo de partículas ordinarias estables: fotones,

neutrinos, protones y electrones, además de sus antipartículas, antiprotones y positrones. Sin embargo, las partículas ordinarias con carga eléctrica (protones, electrones etc.) tienen un problema. La Vía Láctea posee intensos campos magnéticos que tuercen las trayectorias de estas partículas mientras viajan en su seno. El efecto es que, cuando algunas de ellas impactan en la Tierra es imposible saber de qué lugar proceden. Aun así, el flujo global de electrones, protones, positrones y antiprotones es objeto de investigación, ya que puede dar pistas importantes sobre la actividad de la materia oscura. Estos estudios se llevan a cabo con detectores instalados en satélites, como los llamados FERMI o AMS.

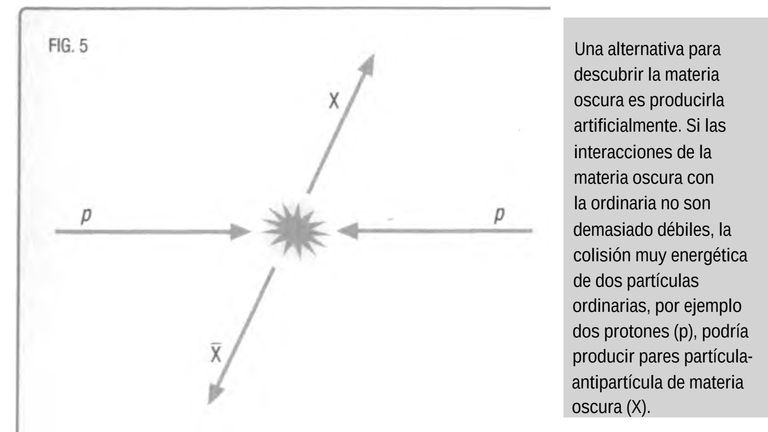
Por otro lado, los fotones y los neutrinos, al no tener carga eléctrica, viajan en línea recta desde el lugar de su producción hasta la Tierra, por lo que son de gran interés. Los fotones son detectados por telescopios de rayos gamma instalados en satélites o en tierra. La detección de neutrinos es difícil, dada su escasísima interacción. Los «telescopios de neutrinos» tienen normalmente un gran tamaño y, al igual que los experimentos de detección directa de materia oscura, se emplazan en lugares subterráneos, protegidos de los rayos cósmicos. Algunos de los más gigantescos utilizan como material de detección grandes cantidades de agua del mar o de hielo del polo Sur (sin producir ninguna alteración en ellos).

Los experimentos de detección indirecta están dando resultados muy interesantes, y periódicamente se encuentran y anuncian señales que potencialmente podrían provenir de la aniquilación de materia oscura. Sin embargo, la interpretación de estas «señales» es delicada, ya que hay fuentes importantes de incertidumbre. Por ejemplo, el centro de la galaxia (el lugar más favorable para la producción de estas señales) es una región con enorme actividad de tipo astrofísico, aún no bien entendida, y que podría producir señales parecidas a las de la aniquilación de la materia oscura. Este «ruido astrofísico» afecta también a la interpretación de las señales provenientes de otras zonas de la galaxia. Se trata de un área de investigación de gran actividad, tanto teórica como observacional.

La producción de materia oscura

La tercera gran estrategia para detectar materia oscura es producirla artificialmente, utilizando para ello colisiones muy energéticas de partículas ordinarias. Aunque la interacción de la materia oscura con la ordinaria es muy pequeña, existe una probabilidad, quizá no despreciable, de que al chocar dos partículas ordinarias se generen partículas X de materia oscura. Si esas colisiones se producen de forma copiosa, como sucede en un acelerador/colisionador de partículas, podemos aspirar a observar la producción de materia oscura en alguna de ellas. Esto está ilustrado en la figura 5, en la que la colisión de dos protones da lugar a una partícula y una antipartícula de materia oscura.

Este tipo de colisiones son precisamente las que tienen lugar en el LHC, el gran colisionador de protones (el más grande y potente del mundo) instalado en el CERN. Una parte importantísima del programa científico del LHC es la búsqueda de partículas no ordinarias. Como vimos en apartados anteriores, existen razones poderosas para pensar que el modelo estándar, a pesar de ser tan exitoso, no es completo; de forma que podemos esperar encontrar nueva física y nuevas partículas en las colisiones producidas en el LHC. De momento no se ha encontrado ninguna señal de este tipo, pero el LHC es un experimento en marcha,



Una alternativa para descubrir la materia oscura es producirla artificialmente. Si las interacciones de la materia oscura con la ordinaria no son demasiado débiles, la colisión muy energética de dos partículas ordinarias, por ejemplo dos protones (p), podría producir pares partícula-antipartícula de materia oscura (X).

así que en los próximos años podemos esperar noticias en este sentido, que naturalmente tendrían una relevancia histórica, como la tuvo en 2012 el descubrimiento del bosón de Higgs. Por supuesto, la sola producción de nuevas partículas (por ejemplo neutralinos) no probaría que son los constituyentes de la materia oscura, pero si su masa e interacción con la materia ordinaria están en el rango adecuado para jugar ese papel, esto sería una indicación muy fuerte a su favor. Los experimentos en el LHC han sido ya muy eficaces para restringir el rango posible para la masa y las interacciones de la partícula X de materia oscura. En este sentido desempeñan una labor complementaria a los experimentos de detección directa.

Como reflexión final de este capítulo, podemos referir la anécdota de que en una conferencia de física teórica, una encuesta entre los científicos participantes arrojó el resultado de que «lo más probable» es que la partícula X de materia oscura sea un axión o un neutralino. Pero, por supuesto, nadie sostiene que esa encuesta tenga ningún rigor científico. Solo la naturaleza tiene autoridad para decidir cuál es la partícula que constituye la materia oscura, y solo nos lo comunicará a través de la observación experimental. La búsqueda debe continuar...

CAPÍTULO 5

La energía oscura y el destino del universo

La energía oscura es sin duda uno de los descubrimientos más extraordinarios e inesperados de los últimos años. Apenas sabemos aún nada de ella, pero es el factor que decidirá el destino del universo.

La energía oscura es una extraña forma de energía que llena de manera uniforme todo el universo. No conocemos su origen ni el por qué de su magnitud. Pero la energía oscura no es solo misteriosa, también es problemática, en el sentido de que es muy difícil acomodarla de forma natural dentro de los esquemas actuales de la física moderna. Esto significa que cuando comprendamos su misterio, seguramente aprenderemos algo nuevo y profundo sobre la naturaleza. En cualquier caso, la energía oscura no es solo una curiosidad enigmática; es el ingrediente que marcará el destino del universo.

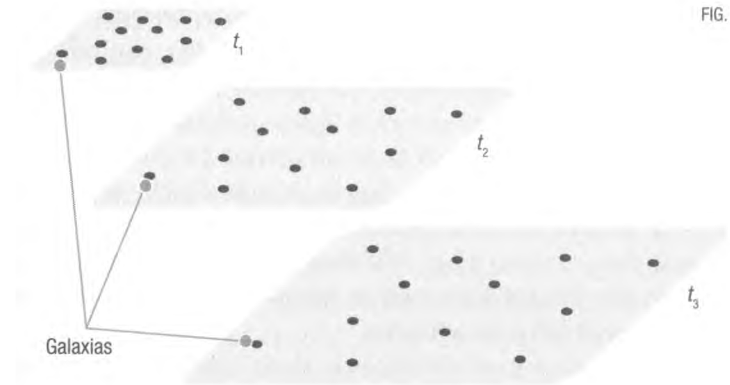
Recordemos que la teoría de la relatividad general predice que el universo ha de pasar necesariamente por una fase de expansión, como efectivamente se observa en la realidad. Profundicemos un poco en las características de dicha expansión. Lo que hay que imaginarse es que es el propio espacio el que se estira, por igual en todas las direcciones, de forma que las galaxias «insertadas» en él se separan progresivamente. Es lo que se llama una *expansión homogénea e isótropa*. Su característica más importante es que no hay ninguna galaxia «privilegiada»: desde cualquiera de ellas la expansión se percibe de la misma forma.

Esto está ilustrado en la figura 1, en la que vemos tres planos que representan una misma «rebanada» del universo en tres momentos diferentes. Cada punto negro simboliza una galaxia.

El estiramiento del espacio ha hecho que las galaxias se alejen unas de otras. Si nos situamos mentalmente en *cualquiera* de los puntos, veremos que los de alrededor se alejan de nosotros. Y también observaremos que los puntos más distantes se alejan a más velocidad, ya que en el mismo lapso de tiempo se han alejado una distancia mayor. Esta es la llamada *ley de Hubble:* la velocidad de alejamiento de cualquier objeto cósmico lejano es proporcional a la distancia que nos separa de él. Esta ley es el signo distintivo de una expansión homogénea e isótropa. Y, efectivamente, las galaxias parecen alejarse de acuerdo con la ley de Hubble. Concretamente se observa que la velocidad de alejamiento de una galaxia aumenta en unos 20 km/s por cada millón de años-luz de distanciamiento (por ejemplo, una galaxia situada a 2000 millones de años-luz se aleja de nosotros a unos 40 000 km/s). Esta constante de proporcionalidad entre distancia y velocidad de alejamiento es la que nos indica el ritmo de expansión del universo.

Ahora hagámonos la siguiente pregunta. El ritmo de expansión del universo ¿cambia con el tiempo? Y más concretamente: ¿en el futuro, el universo continuará expandiéndose al mismo ritmo?

Desde el punto de vista teórico, la pregunta puede responderse a partir de la ecuación principal de la teoría de la relatividad general (ecuación [2], en la pág. 42), que es la que describe cómo evoluciona el espacio y el tiempo en un sistema físico. Recordemos que, según esa ecuación, la geometría del espacio-tiempo (y, por tanto, la forma espacial del universo y su evolución temporal) está *determinada* por la materia y la energía que contiene. Pues bien, la ecuación predice que para un universo lleno de radiación y materia (da lo mismo que sea ordinaria u oscura), el ritmo de expansión debe *ralentizarse* con el tiempo. (No estamos considerando todavía la posibilidad de que el universo contenga también energía oscura.) Esto es bastante intuitivo. Las galaxias se alejan unas de otras por efecto de la explosión inicial, pero su atracción gravitatoria hace que la expansión se



La figura muestra esquemáticamente una misma porción del universo en tres momentos sucesivos. Dado que el universo experimenta una expansión homogénea e isótropa, no hay ningún punto privilegiado. Desde cualquier galaxia, un observador percibiría que el resto de las galaxias se alejan de manera semejante.

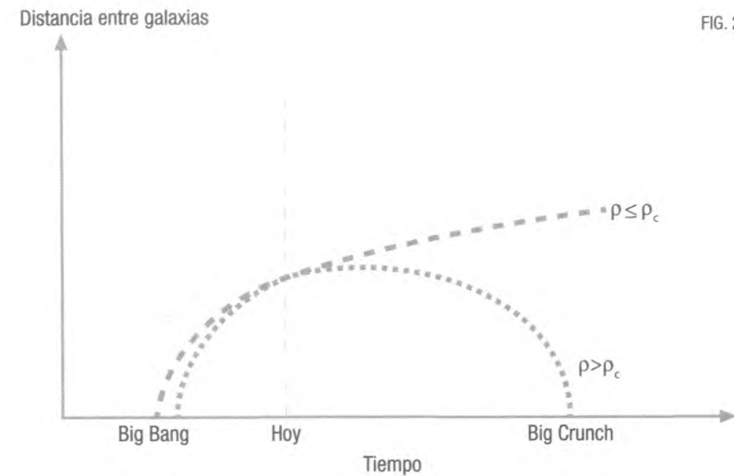
frene, igual que una piedra lanzada hacia arriba es frenada por la atracción gravitatoria. De hecho, si la cantidad de materia fuera suficiente, la atracción gravitatoria sería tan grande que llegaría un momento en que el proceso se invertiría, y las galaxias retrocederían sobre sí mismas, como le sucedía a nuestra piedra anterior. Nuevamente todo depende de si la densidad del universo, p, es menor o mayor que la densidad crítica, p_c (recordemos que p_c es aproximadamente un miligramo por cada billón de kilómetros cúbicos). Si fuera menor o igual, $p < p_c$, entonces el universo continuaría eternamente su expansión, si bien cada vez más ralentizada. Si fuera mayor, $p > p_c$, llegaría un momento en que el espacio dejaría de estirarse y empezaría a contraerse: las galaxias se acercarían unas a otras y todo acabaría en una gran implosión o «Big Crunch», que marcaría el instante final del universo. Estas dos posibilidades están ilustradas por las dos líneas de puntos de la figura 2.

Para comprender bien la figura notemos que hoy en día conocemos la distancia entre las galaxias y el ritmo de expansión. Por tanto, las dos curvas, que representan las dos posibilidades,

deben coincidir en el momento actual (marcado como «Hoy» en la figura); y también debe coincidir su pendiente, que refleja el ritmo de expansión que observamos hoy en día. Sin embargo, si $p > p_c$, el ritmo de expansión en el pasado tuvo que ser mayor que si $p < p_c$, como se aprecia en la figura. Esto hace que cuando vamos mentalmente hacia atrás en el tiempo (nos movemos hacia la izquierda en el gráfico), llegamos más rápido al Big Bang (punto en el que la curva corta el eje horizontal) para el caso $p > p_c$ que para el caso $p < p_c$. En otras palabras, si $p>p_c$, el Big Bang tuvo que ocurrir hace menos tiempo que si $p < p_c$. Esta discusión nos será útil más adelante.

¿Y cuál de las dos posibilidades es la que tiene lugar en nuestro universo real? Lo curioso es que, tal como discutimos en el capítulo 3, la densidad promedio del universo resulta ser aproximadamente igual a la crítica. Dadas las imprecisiones observacionales, no es posible decidir si es un poquito más grande, un poquito más pequeña o exactamente igual. Entonces... ¿seguimos sin saber el destino del universo? Recordemos que en este análisis teórico hemos supuesto que el universo contiene solo materia y radiación, tal como se creyó hasta 1998. Pero, como veremos enseguida, la presencia de la energía oscura lo cambia todo.

Consideremos ahora el punto de vista observacional. Naturalmente no podemos observar el futuro para comprobar si la expansión continuará eternamente o se producirá un Big Crunch. Pero sí es posible estudiar cómo ha evolucionado el ritmo de expansión desde la primera época del universo hasta ahora mismo. Para ello hay que recordar que cuando miramos un objeto lejano, no lo vemos como es ahora mismo, sino como era cuando emitió la luz que ahora nos llega. Por consiguiente, midiendo las velocidades de alejamiento de objetos situados a diferentes distancias, es posible deducir cómo era el ritmo de expansión del universo en distintas épocas. Pero para esta tarea es necesario determinar la distancia a la que está el objeto y su velocidad de alejamiento por métodos independientes. La velocidad de alejamiento de un objeto por sí sola no nos dice nada sobre el ritmo de expansión del universo, ya que siempre habrá objetos suficientemente distantes para alejarse a cualquier



La gráfica ilustra el ritmo de expansión del universo a lo largo del tiempo, dependiendo de la cantidad de materia que contenga, y suponiendo que no hay energía oscura. Si la densidad de materia es menor o igual que la densidad crítica ($p < p_c$), continuará su expansión de manera perpetua, aunque cada vez más ralentizada. En el caso contrario ($p>p_c$), llegará un momento en que la expansión se detendrá y el universo comenzará a contraerse, terminando su existencia en una gran implosión o Big Crunch.

velocidad que imaginemos. Para determinar realmente el ritmo de expansión cósmica hemos de calcular la proporcionalidad entre la velocidad de alejamiento del objeto y la distancia a la que se encuentra, para lo cual necesitamos algún método para medir esa distancia. Una forma de conseguirlo es comparar la luminosidad aparente del objeto con la real. Imaginemos unos pescadores que, en una noche oscura, no saben a que distancia se encuentran de la costa (¡suponemos que su sistema GPS se ha estropeado!). Sin embargo, divisan la luz familiar de un faro. Comparando el brillo aparente del faro con el brillo real del mismo, podrían deducir con precisión a qué distancia se encuentran de él (cuanto menos brillo aparente, mayor será la distancia). Pero para ello necesitan conocer bien el faro, saber cuál es su luminosidad real. Análogamente, para nuestra tarea de determinar la distancia de objetos lejanos, necesitamos «faros» en el universo, cuyo brillo real conozcamos. Comparando

el brillo aparente con el real podremos determinar la distancia a la que se encuentran, como hacían nuestros pescadores.

En este sentido unos faros excelentes son las llamadas *supernovas* del tipo Ia. Las supernovas son estrellas en explosión, y las de este tipo son especialmente útiles porque producen siempre, con gran regularidad, el mismo brillo real. Así que, cuando vemos una supernova del tipo Ia, midiendo su brillo aparente podremos deducir la distancia a la que se encuentra. Otra ventaja de estas supernovas es que son muy brillantes (¡tanto como la galaxia entera que las acoge, o incluso bastante más!), por lo que pueden ser observadas a distancias cósmicas. Por otro lado, su velocidad de alejamiento puede ser calculada de la forma usual, gracias al desplazamiento al rojo de la luz que emiten. Una vez determinadas las lejanías y velocidades de distintas supernovas, se puede evaluar el ritmo de expansión del universo en épocas diferentes. La desventaja es que las supernovas Ia no son frecuentes. En una galaxia típica, como la Vía Láctea, puede aparecer una supernova cada cien años. Una vez producida la explosión, el intensísimo brillo dura unas pocas semanas antes de extinguirse. Naturalmente, en la práctica no se puede centrar la observación en una galaxia lejana y esperar cien años a que se produzca la deseada supemova. Lo que hay que hacer es mirar muchas galaxias (miles de ellas) a la vez.

Ese fue el objetivo de dos proyectos científicos de los años noventa: el High-z Supernova Search Team y el Supemova Cosmology Project. Observando del orden de un millón de galaxias por noche, estos equipos de investigadores descubrieron muchas supernovas del tipo Ia a diferentes distancias. Comparando esas distancias con las correspondientes velocidades de alejamiento, los dos proyectos fueron capaces de calcular cómo había variado el ritmo de expansión del universo desde épocas remotas hasta ahora. Es interesante destacar que ambos grupos de investigadores se habían propuesto medir la *ralentización* de la expansión, ya que se daba por hecho que el universo estaba frenando su ritmo de expansión. Pero lo que encontraron no fue eso... ¡sino que la expansión estaba acelerándose! Como pequeña digresión, mencionemos que desde círculos intelectuales críticos con la objetividad de la ciencia se hacen a veces afirmaciones del tipo «los científicos encuentran solo aquello que buscan» o «los científicos interpretan los resultados experimentales de forma que confirmen sus prejuicios teóricos». Por supuesto, los científicos no son perfectos y están sujetos a prejuicios, como todos los humanos. Pero es indudable que el método científico es un gran antídoto contra los prejuicios. Hay muchos ejemplos en los que los científicos encontraron justo lo contrario de lo que buscaban, y, aunque en algunos casos se resistieron a aceptar sus propios resultados, al final los hechos objetivos terminaron por imponerse. Un factor que contribuye decisivamente a este proceso es que los experimentos u observaciones han de poder ser reproducidos por otros grupos científicos, proporcionando así una verificación cruzada de los resultados. Volviendo a nuestro caso, los dos grupos competidores observaron de manera independiente el mismo hecho sorprendente: la expansión del universo está acelerándose, un proceso que comenzó hace unos 4000 millones de años. Los dos grupos presentaron sus resultados en 1998, y desde entonces han sido repetidamente confirmados por otros equipos. En 2011 los físicos estadounidenses Saúl Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess, líderes científicos de los dos proyectos pioneros, recibieron el premio Nobel de física por esta contribución sobresaliente.

Naturalmente, si el universo está acelerando su expansión, «algo falla» en el razonamiento teórico inicial, basado en las ecuaciones de la relatividad general, que predecían que la expansión debería frenarse. ¿Es que están mal las ecuaciones de Einstein?

INTERPRETACIÓN TEÓRICA: LA ENERGÍA OSCURA

En el capítulo 2 dijimos que Einstein modificó la forma original de sus ecuaciones, añadiendo un término a las mismas (el llamado término de la «constante cosmológica») para que pudieran acomodar un universo estático; modificación de la que luego se arrepintió, cuando se observó que el universo no era

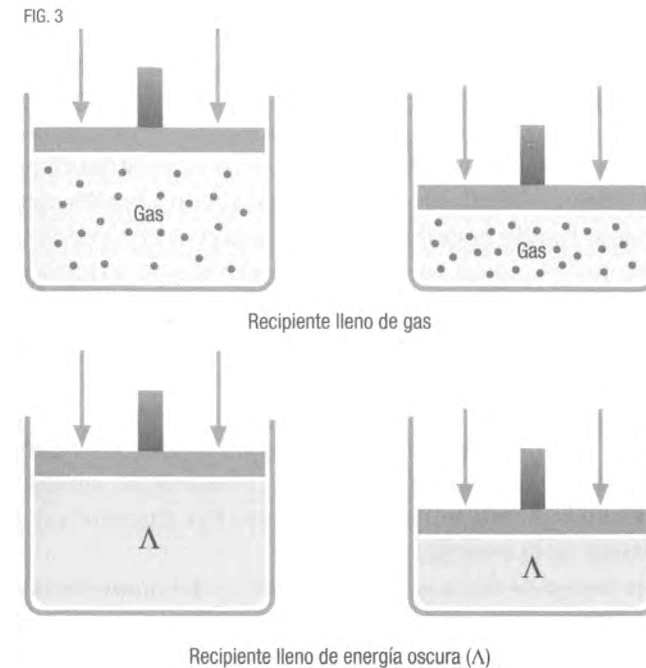
estático sino que se expandía. Lo asombroso es que aquella denostada constante cosmológica (en una versión algo diferente de la imaginada por Einstein) es capaz de explicar por qué el universo se expande aceleradamente. Vamos a profundizar un poco en esta idea.

En la pág. 42 escribimos la ecuación principal de la relatividad general. La ecuación modificada con el término de la constante cosmológica tiene el aspecto siguiente:

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} R = T^{\mu\nu} + \Lambda g^{\mu\nu} \qquad [5]$$

Nuevamente, no vamos a precisar el significado de los símbolos de esta ecuación, pero el lector observará que en el miembro de la derecha se ha introducido un término adicional, $\Lambda g^{\mu\nu}$. Λ es la llamada *constante cosmológica*. Una interpretación de Λ es que constituye una contribución a la cantidad $T^{\mu\nu}$, que aparece también en el miembro de la derecha. $T^{\mu\nu}$ es el llamado *tensor energía-momento*, y representa la materia y la energía del universo. Así que Λ puede interpretarse como una contribución *constante* a la densidad de energía del universo. Su significado físico es el de una energía que se extiende de manera uniforme por todo el universo, incluso por los espacios aparentemente vacíos. Dado que no conocemos su origen, y ni siquiera si es exactamente constante, actualmente se prefiere la denominación *energía oscura* para referirse a esta misteriosa Λ.

¿Cuál es el efecto físico de la energía oscura, Λ? Al resolver la ecuación [5], resulta que el universo sigue sufriendo una fase de expansión (como efectivamente se observa), pero ahora ¡la expansión se acelera con el tiempo! (también como se observa). Esto sucede porque Λ produce una *repulsión* gravitatoria, idea que ciertamente choca con nuestra intuición habitual de que la gravedad es siempre una fuerza atractiva. Aquí hay que pensar que las ecuaciones de la relatividad general implican que las fuerzas gravitatorias no solo están originadas por la materia y la energía, sino también por la *presión* que esta materia y energía ejercen, lo que supone una modificación conceptual importante con respecto a la ley de gravitación de Newton. Y sucede que si la presión es negativa, da lugar a una fuerza repulsiva. Esto está muy bien, pero... ¿qué es una presión negativa?



Cuando comprimimos un gas, este almacena la energía que hemos empleado para presionarlo, y que por tanto aumenta. Si pudiéramos hacer lo mismo con la energía oscura, veríamos que su energía disminuye, ya que es proporcional al volumen que ocupa. Se dice que la presión del gas es positiva, mientras que la de la energía oscura es negativa.

Para entenderlo consideremos los dos recipientes de la figura 3, ambos tapados por un émbolo móvil. El primer recipiente contiene gas, y el segundo, energía oscura. Naturalmente la energía oscura del universo se extiende por todos los espacios, y no podemos confinarla en un recipiente, así que esta es una situación ficticia, pero útil para ilustrar la idea. La presión que ejerce el gas es presión positiva, que no es más que la presión ordinaria. Su característica es que si empujamos el émbolo para disminuir el volumen del gas, nos costará un esfuerzo. Eso significa que el gas, confinado ahora en un espacio más pequeño, almacena una mayor energía (la que le hemos comunicado al

presionar el émbolo). Consideremos ahora el recipiente lleno de energía oscura. Ya que la densidad de energía oscura es, por definición, invariable, la energía almacenada en el recipiente es simplemente proporcional al volumen que ocupa. Si bajamos el émbolo, su volumen disminuye, y por tanto la energía almacenada disminuye; justo lo contrario de lo que le sucedía al gas. Este tipo de comportamiento es lo que se llama presión negativa. Y es esta presión negativa la que conduce a una repulsión gravitatoria. Así es como la energía oscura puede explicar la expansión acelerada que se observa en el universo.

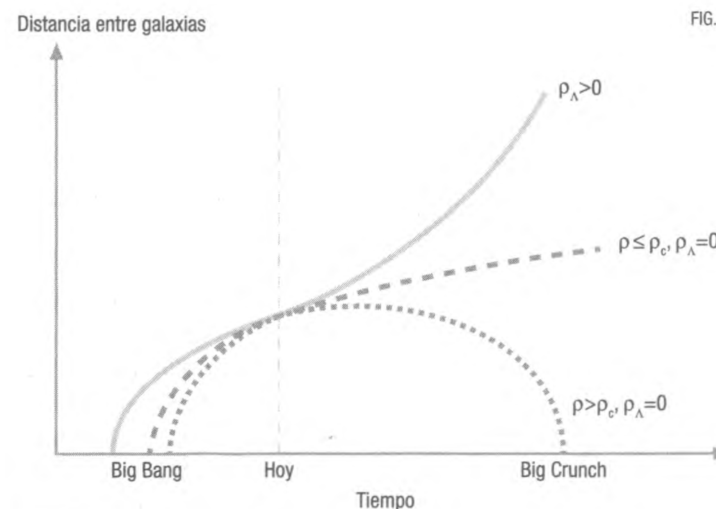
Por supuesto, otra posibilidad es que las ecuaciones de Einstein requieran una modificación más radical que la sola incorporación del término de la energía oscura. De hecho, muchos físicos teóricos han considerado y trabajan en esa idea; pero hasta ahora las observaciones de la expansión cósmica acelerada se ajustan perfectamente a la explicación sencilla proporcionada por la hipótesis de la energía oscura.

Desde un punto de vista más cuantitativo, la expansión acelerada del universo, puesta de manifiesto por las supernovas, requiere para su explicación una cantidad de energía oscura que supone, aproximadamente, el 68% de la densidad crítica, ρ_c. Dijimos en el capítulo 3 que el análisis del espectro sonoro de la radiación de fondo indica que la densidad total del universo se aproxima mucho a la densidad crítica, ρ_c. Dado que la materia ordinaria supone el 5% de ρ_c y la materia oscura, el 27% de ρ_c, vemos que la energía oscura encaja perfectamente con el 68% que faltaba para completar la densidad total del universo. Hay que decir que, históricamente, la primera señal de que en el universo había un gran componente de energía oscura surgió del estudio de las supernovas. Las indicaciones complementarias a partir de la radiación de fondo fueron encontradas con posterioridad, y sin duda han supuesto un respaldo muy importante a la interpretación de la expansión acelerada del universo como una consecuencia de la energía oscura.

La energía oscura parece estar efectivamente ahí, siendo el ingrediente más importante del universo actual... y también el que marcará su destino.

EL DESTINO DEL UNIVERSO

El descubrimiento de la energía oscura obliga a reconsiderar la cuestión que planteábamos hace unas páginas: ¿Cómo será el ritmo de expansión del universo en el futuro? Acabamos de ver que la energía oscura ha producido una aceleración de la expansión en los últimos miles de millones de años. La ecuación principal de la relatividad general predice que esa aceleración proseguirá en el futuro, eternamente, y ello independientemente de cuál sea la densidad exacta de materia (ordinaria y oscura) y radiación. La energía oscura domina ya el contenido del universo y marca el ritmo de su expansión, y lo hará cada vez más en el futuro, ya que su densidad permanece constante, mientras que la densidad de materia y radiación se va diluyendo a medida que el universo crece. Por ello, ¡la existencia de la energía oscura hace que podamos predecir con solvencia el futuro del universo! Esto está



Cuando hay energía oscura presente ($\rho_\Lambda > 0$), llega un momento en que esta domina el universo, el cual comienza a expandirse de forma cada vez más rápida (línea continua). Esto contrasta con la evolución del universo si no hay energía oscura, en cuyo caso la expansión se ralentiza o incluso se invierte (líneas de puntos).

ilustrado en la figura 4, que es idéntica a la figura 2, pero con una línea adicional (la línea continua), que representa la evolución del universo cuando contiene una cierta densidad de energía oscura, llamada ρ_Λ en la figura.

Podemos observar que en el futuro la expansión continuará a un ritmo cada vez mayor. La evolución descrita por las líneas de puntos sería la real si no hubiera densidad de energía oscura, de ahí la leyenda $\rho_\Lambda = 0$ para esas líneas. Sin embargo, las observaciones indican que la energía oscura está realmente ahí, con $\rho_\Lambda > 0$. Por cierto, a la vista de la figura 4 está claro que si el universo contiene energía oscura (línea continua), el tiempo transcurrido entre el Big Bang (momento en el que la distancia entre galaxias es cero) y el momento actual es mayor que si no la hubiera (líneas de puntos). Si hay energía oscura, el cálculo indica que la edad del universo es de unos 13 800 millones de años. Si no la hay, el cálculo indica que la edad del universo es inferior a 12 000 millones de años. Esto es interesante por lo siguiente. La edad del universo ha de ser mayor, lógicamente, que la de cualquier objeto que contenga. En particular, ha de ser mayor que la edad de las estrellas más viejas conocidas, que son las estrellas de los llamados cúmulos globulares (pequeñas aglomeraciones esféricas de estrellas en la periferia de la Vía Láctea). Esas estrellas tienen más de 12 000 millones de años, por lo que si *no* hubiera energía oscura serían más antiguas que el propio universo, una situación inverosímil. ¡Otro argumento más a favor de la energía oscura!

Es importante recordar que, para llegar a la conclusión de que el universo continuará eternamente su expansión acelerada, hemos asumido que la densidad de energía oscura es efectivamente *constante*. Hasta ahora todo indica que lo es, pero podría ser que no lo fuera exactamente. Por ejemplo, podría ser que la energía oscura estuviera disminuyendo de forma imperceptible, y que en un futuro lejano llegara a extinguirse. Al fin y al cabo, no conocemos el origen de la energía oscura y no podemos descartar esta posibilidad. En ese caso terminaríamos por volver a la situación descrita por las líneas de puntos en la figura 4.

Sin olvidar esta última precaución, discutamos ahora cómo será el futuro del universo si, en efecto, la densidad de energía

> El futuro ya no es lo que era.
>
> Paul Valéry

oscura no cambia con el tiempo, como parecen indicar los datos. Las galaxias continuarán alejándose unas de otras, a un ritmo cada vez mayor. Desde nuestra galaxia, la Vía Láctea, veremos como se alejan todas las galaxias distantes a una velocidad creciente, hasta que llegue un momento que superen la velocidad de la luz. Esto puede parecer contradictorio con la teoría de la relatividad, que nos dice que la velocidad de la luz es la máxima posible, pero realmente no hay contradicción. Lo que dice la teoría de la relatividad es que no se pueden enviar viajeros o señales a velocidades mayores que la de la luz de un sistema físico a otro. Por ejemplo, no podemos viajar de una galaxia a otra a una velocidad mayor que la de la luz. Pero en el caso de la expansión acelerada, lo que en rigor está pasando es que se está *creando espacio* entre las galaxias a un ritmo creciente. Esto hace que, de manera efectiva, las galaxias distantes se alejen de nosotros a velocidades superlumínicas, pero nunca podríamos «montamos en una de ellas» para viajar de una galaxia a otra, ya que todas se están distanciando unas de otras. Por tanto, todo es perfectamente consistente con la teoría de la relatividad. Una vez que su velocidad de alejamiento efectiva supera la de la luz, las galaxias dejan de ser visibles. La razón es que la luz que emiten viaja hacia nosotros, pero el espacio que hay en medio se está estirando a una velocidad aún mayor, de forma que la luz nunca nos alcanza. Es como un caracol tratando de alcanzar una hoja de lechuga: si ambos están colocados sobre una superficie de goma que se está estirando, el caracol nunca la alcanzará; de hecho cada vez estará más lejos de ella. Del mismo modo, la luz emitida por esas galaxias distantes nunca nos alcanzará, por lo que se volverán invisibles a todos los efectos. En la terminología relativista se dice que «habrán salido de nuestro horizonte». Solo las galaxias cercanas, pertenecientes a nuestro grupo local, permanecerán visibles, ya que están ligadas a nosotros por la atracción gravitatoria.

Dentro de unos 100 000 millones de años la situación será más o menos la siguiente. El Sol, después de pasar por una etapa de gigante roja (que habrá aniquilado la vida en la Tierra y quizá el propio planeta), se habrá convertido en una enana blanca

extraordinariamente pálida, camino de convertirse en una enana negra e incapaz de albergar planetas con vida. La Vía Láctea también habrá cambiado de aspecto, puesto que habrá sufrido procesos de colisión y fusión con las galaxias vecinas. Muchas de sus estrellas actuales se habrán apagado, siguiendo un proceso parecido al del Sol. Sin embargo, habrán nacido muchas estrellas nuevas, y una parte de ellas aún brillará. Es razonable pensar que en algunos planetas asociados a esas estrellas habrán surgido civilizaciones inteligentes. ¿Y qué verán a su alrededor esos seres inteligentes? Absolutamente nada. Con excepción de las estrellas y galaxias vecinas, verán un vacío sepulcral en el inmenso universo que les rodeará. No solo no verán las galaxias distantes, sino que no recibirán absolutamente ninguna información del exterior de la galaxia. Por ejemplo, la radiación de fondo actual se habrá enfriado de tal manera que será totalmente invisible. Realmente, será difícil para ellos deducir a partir de sus observaciones que el universo se está expandiendo. Nosotros lo sabemos gracias a que vemos como las galaxias distantes se alejan de nosotros, siguiendo la ley de Hubble, y también gracias a la radiación de fondo, que es un testimonio luminoso de la gran explosión. Ellos no verán nada de todo eso. ¡Para ellos será mucho más difícil que para nosotros investigar el origen y la estructura del universo!

En épocas aún más futuras, todas las estrellas se apagarán, toda vida se extinguirá, y el universo seguirá expandiéndose eternamente, esparciendo los cadáveres helados de estrellas y planetas. ¡No cabe duda de que vivimos en una época privilegiada!

LOS MISTERIOS DE LA ENERGÍA OSCURA

La existencia de la energía oscura suscita preguntas profundas, aún sin respuesta: ¿cuál es el origen de esa densidad de energía que llena el universo?; ¿por qué tiene el valor que tiene? De hecho, el misterio de la energía oscura va incluso más allá de estas preguntas. Para entenderlo, conviene que nos situemos mentalmente en los años anteriores a 1998, cuando prácticamente nadie había pensado en la posibilidad de que existiera una energía oscura. Lo curioso es que, incluso en aquellos años, ¡la energía oscura *ya* era un misterio! Veamos por qué.

Posiblemente, cuando hemos descrito las características de la energía oscura, es decir «una densidad de energía constante, que se extiende uniformemente por todo el universo, incluso por los espacios aparentemente vacíos», el lector haya recordado la definición del campo de Higgs que hicimos en el capítulo 4 usando términos muy parecidos. En aquel caso era el campo de Higgs el que se extendía uniformemente por todo el espacio (la interacción de las partículas elementales con dicho campo es lo que les confiere masa a estas). Efectivamente, la energía oscura y el campo de Higgs son conceptos tan similares que resulta tentador identificarlos: ¿No podría ser el campo de Higgs el responsable de la energía oscura? Pues bien, lo cierto es que no puede; al menos no puede ser el único responsable, ya que produce una contribución a la energía oscura que es... ¡demasiado grande! (y además de signo negativo). Y no es la única contribución importante. En el contexto de la física de partículas moderna, sistematizada en el exitoso modelo estándar (véase el capítulo 4), sucede que hay muchas contribuciones potenciales a la energía del vacío. Según el modelo estándar, los objetos básicos de la naturaleza son los campos, y las partículas elementales surgen como las excitaciones cuánticas de ellos. Por ejemplo, los fotones son las excitaciones del campo electromagnético; los quarks, las excitaciones de los campos de quarks, etc. Y esos campos contribuyen de formas diversas (positivas y negativas) a la energía del vacío, y siempre con aportaciones gigantescas, muy superiores a la cantidad de energía oscura que realmente se observa. Esto resultaba muy chocante antes de 1998: la energía oscura parecía ser cero (aún no se había descubierto), lo que exigía una cancelación «mágica» entre todas las gigantescas contribuciones a la misma. El problema teórico, llamado en aquellos años «problema de la constante cosmológica», era tan grande que la mayoría de los físicos sospechaban que realmente la energía oscura debía ser exactamente cero. En otras palabras, se pensaba que debía existir algún motivo por el que la gravitación no era sensible a la energía asociada al vacío.

DEL BIG BANG A LA EXPANSIÓN ACELERADA

EL BIG BANG

En el primer instante apareció, supuestamente, un universo minúsculo. Posiblemente, casi de inmediato, el universo entró en una época inflacionaria, durante la cual esa pequeña región espacial multiplicó su tamaño de forma exponencial en una pequeña fracción de segundo. Al terminar la inflación el universo se llenó de materia y radiación. La temperatura en aquel momento era extraordinariamente alta y fue descendiendo a medida que el universo seguía expandiéndose. Esta época inicial es la denominada genéricamente como Big Bang.

EL UNIVERSO SE ENCIENDE

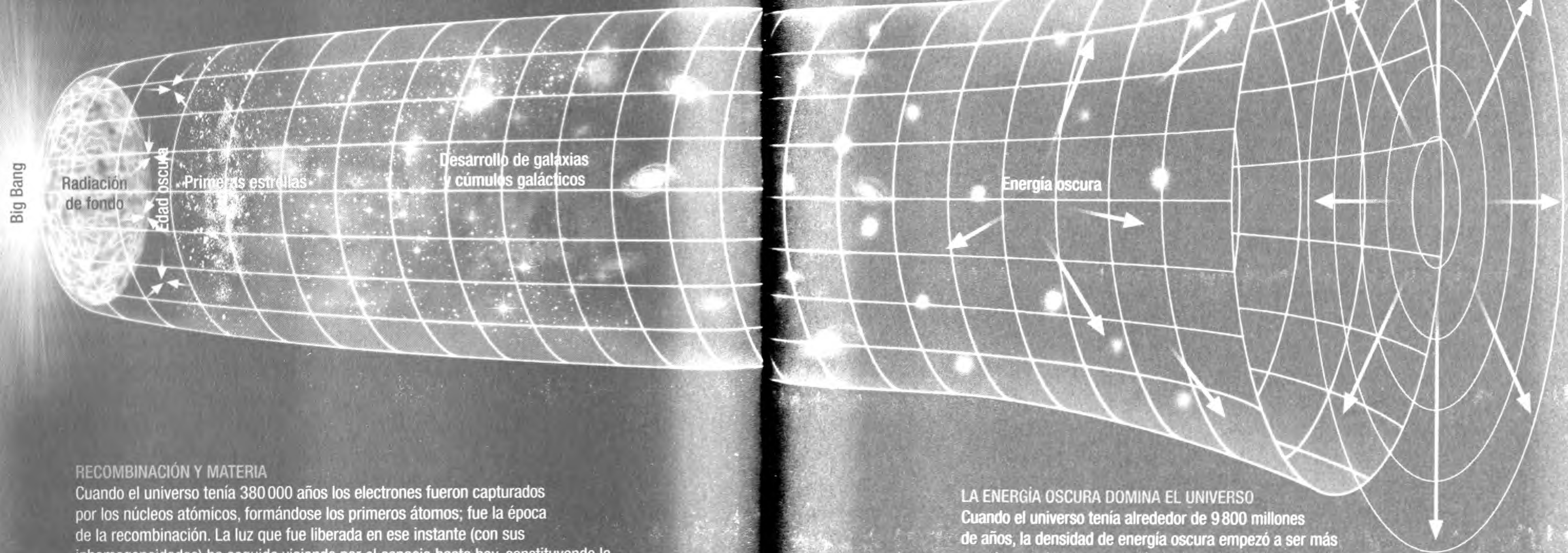
La materia fue concentrándose poco a poco en torno a las zonas de más densidad; en este proceso de agrupamiento la materia oscura jugó un papel esencial. Las primeras estrellas (seguramente con sus planetas) todavía tardaron varios cientos de millones de años en formarse. En ese momento fue como si se encendieran lámparas en el universo; por eso a veces se dice que entre la recombinación y la formación de las primeras estrellas hubo una «edad oscura», si bien esta denominación no tiene nada que ver con la materia y la energía oscuras.

SE FORMAN LAS GALAXIAS

Las galaxias y cúmulos de galaxias fueron tomando forma. Hay que tener en cuenta que a medida que el universo se expandía, la densidad de materia (y de radiación) iba diluyéndose; sin embargo, la densidad de la energía oscura, por su propia naturaleza, se mantenía constante.

EXPANSIÓN ACELERADA

Si la energía oscura mantiene su presencia, como hasta ahora lo ha hecho, la expansión acelerada continuará, y llegará un momento en que los grupos de galaxias se desgajarán unos de otros hasta perder todo contacto. Las estrellas y la vida se irán apagando gradualmente.



RECOMBINACIÓN Y MATERIA

Cuando el universo tenía 380 000 años los electrones fueron capturados por los núcleos atómicos, formándose los primeros átomos; fue la época de la recombinación. La luz que fue liberada en ese instante (con sus inhomogeneidades) ha seguido viajando por el espacio hasta hoy, constituyendo la radiación de fondo de microondas. Además de la materia ordinaria (la constituida por los átomos), la materia oscura estaba ya presente y de hecho era el ingrediente más importante del universo (la energía oscura era todavía irrelevante).

LA ENERGÍA OSCURA DOMINA EL UNIVERSO

Cuando el universo tenía alrededor de 9 800 millones de años, la densidad de energía oscura empezó a ser más grande que el resto, convirtiéndose en el principal ingrediente del universo, el cual empezó a acelerar su expansión. Esa es la época en la que estamos viviendo hoy día, cuando el universo tiene unos 13 800 millones de años de antigüedad.

LA ENERGÍA OSCURA Y EL DESTINO DEL UNIVERSO

Pero eso no bastaba con decirlo, sino que requería modificar la teoría de la relatividad de alguna manera sutil para que, sin estropear todos los éxitos extraordinarios de esta, se consiguiera que, efectivamente, la gravitación no fuera sensible a la energía del vacío. Esa «modificación sutil» nunca llegó a ser formulada, a pesar de las muchas intentonas. Y justamente cuando los físicos teóricos se devanaban la cabeza para entender por qué la constante cosmológica era cero... ¡se descubre en 1998 que realmente no es cero! Lo cierto es que esto sería perfecto desde el punto de vista teórico si la cantidad de energía oscura que se observa en el universo fuera la que naturalmente parece implicar el modelo estándar. Pero, como hemos dicho antes, en realidad es muchos órdenes de magnitud más pequeña. Así que ahora la situación es aún más desconcertante que antes de 1998: no sabemos por qué la energía oscura es distinta de cero, y tampoco sabemos por qué es tan pequeña. Cuando decimos en este contexto que la energía oscura es muy pequeña, esta afirmación puede resultar sorprendente, ya que hemos insistido en que es el ingrediente principal del universo; pero esto no contradice el hecho de que, teóricamente, uno esperaría que fuese aún mucho mayor.

El problema de la energía oscura es sin duda uno de los grandes retos de la física del siglo xxi, y un tema de investigación apasionante. Parece claro que, cuando se resuelva, aprenderemos algo muy profundo acerca de la naturaleza.

Mientras muchos físicos teóricos intentan entender el porqué de la existencia y características de la energía oscura, hasta ahora con poco éxito, otros grupos de científicos tratan de conocerla mejor desde el punto de vista experimental. Además de los estudios de las supernovas, actualmente se está utilizando otro tipo de observaciones para extraer información sobre la energía oscura. Concretamente, muchos proyectos actuales y futuros se centran en la exploración de la distribución de galaxias en el universo. La idea es la siguiente. La forma en que las galaxias están distribuidas en el universo actual es heredera de las fluctuaciones originales, registradas en el mapa de la radiación de fondo (véase el recuadro «Las semillas de las galaxias», pág. 107). Recordemos que aquel mapa presentaba un granulado básico, una distancia típica en la que era más probable que un punto pasase de ser caliente (denso) a frío (poco denso). Esa distancia se correspondía con la longitud de onda fundamental del espectro sonoro del plasma primitivo, y sigue siendo visible en la distribución de galaxias actual, amplificada por la expansión del universo desde la recombinación hasta ahora. Estudiando el tamaño aparente de esta longitud a diferentes distancias, y por tanto en diferentes momentos de la historia del universo, se puede reconstruir el ritmo de la expansión cósmica, y de ahí obtener información sobre la energía oscura. Ahora mismo, el objetivo principal es determinar si la densidad de energía oscura ha sido realmente constante a lo largo de la historia del universo o ha cambiado ligeramente. Esto es muy importante, ya que puede dar claves sobre su origen físico. Por ejemplo, si la energía oscura está asociada a un campo, semejante al campo de Higgs, que llena el universo y cuyo valor evoluciona lentamente; eso debería reflejarse en el ritmo de expansión del universo. De momento, todas las observaciones son consistentes con una energía oscura perfectamente constante, pero los proyectos de observación que están en marcha podrían deparamos sorpresas.

EL PRINCIPIO ANTRÓPICO Y EL MULTIVERSO

Ahora que nos acercamos al final del libro vamos a entrar en un terreno mucho más especulativo. Hemos dicho que pocos científicos previeron la existencia de la energía oscura. Pero hay una excepción muy notable. En 1987, el físico teórico estadounidense Steven Weinberg (premio Nobel de física en 1979 por sus contribuciones a la construcción del modelo estándar) sugirió que la constante cosmológica (o sea, la densidad de energía oscura) podría ser distinta de cero. No solo eso, sino que sugirió en qué rango podría encontrarse su valor, acertando de pleno con las observaciones realizadas una década después. ¿En qué se basó Weinberg para su sorprendente y exitosa predicción?

Para entenderlo, hemos de comprender primero el concepto de *principio antrópico*. Este principio es sencillamente una verdad

autoevidente: «los seres vivos solo pueden habitar en entornos físicos aptos para la vida». Es una verdad tan obvia que podría pensarse que no tiene ninguna implicación interesante. Sin embargo, el principio adquiere fuerza cuando tenemos un gran conjunto de entornos físicos con características variadas. Por ejemplo, en la Vía Láctea hay miles de millones de planetas con condiciones físicas diferentes (gravedad, temperatura, atmósfera, etc.). Seguramente, solo en una pequeña parte de ellos se dan las condiciones para la aparición de la vida. Por tanto, solo en esos planetas podrán surgir seres inteligentes, capaces de observar su entorno. Y, naturalmente, lo que observarán será un planeta con condiciones ideales para el florecimiento de la vida. Es exactamente lo que nos sucede a nosotros cuando observamos la Tierra: su atmósfera, temperatura, contenido de agua, etc. parecen diseñados a propósito para que podamos habitarla. Pero no hay ningún diseño: simplemente hay miles de millones de planetas, la mayor parte de ellos inhabitables, y una minoría aptos para la vida. Necesariamente, nosotros, por el simple hecho de estar vivos, tenemos que habitar en uno de esos raros planetas con condiciones privilegiadas. Pero si no supiéramos que ahí fuera hay una infinidad de planetas (por ejemplo, si no se hubiera inventado aún el telescopio), entonces las exquisitas condiciones de la Tierra para poder albergar la vida *sí* parecerían algo sorprendente e incluso inexplicable. Por ejemplo, si la distancia de la Tierra al Sol no fuera la que es, con bastante exactitud, no podría haber agua en estado líquido sobre la Tierra. Si la distancia fuera mayor, el agua se congelaría; si fuera menor, se evaporaría. Así que, si no supiéramos de la existencia de otros planetas, nos parecería como si «alguien» hubiese colocado la Tierra a la distancia exacta del Sol para permitir la existencia de agua líquida, la cual es indispensable para toda la vida conocida Sin embargo, cuando pensamos que hay miles de millones de planetas, entonces ya no hay nada extraordinario en ello: una pequeña fracción de los planetas está a la distancia adecuada de su estrella para contener agua líquida. Y nosotros tenemos que estar necesariamente en uno de esos raros planetas.

¿Qué tiene que ver todo esto con la energía oscura? Pues que solo si la energía oscura está en un rango reducido de valores es posible el surgimiento de la vida en el universo. Si la densidad de energía oscura fuera mucho más grande, entonces el proceso de expansión acelerada habría comenzado demasiado pronto y de forma muy intensa. Esto habría provocado una dispersión de las partículas de materia, las cuales nunca se habrían juntado para formar estrellas y planetas. La vida no hubiera sido posible. Por otro lado, la energía oscura podría haber tenido un valor negativo (un concepto que aquí no podemos desarrollar). El efecto de una energía oscura negativa en las ecuaciones de Einstein es que el universo colapse (en contraste con la de signo positivo, que hace que el universo se expanda aceleradamente). Si la magnitud de esa energía oscura negativa fuera demasiado grande, el proceso de colapso se produciría antes de la formación de las estrellas y los planetas, impidiendo así el surgimiento de la vida. Según el cálculo de Weinberg (posteriormente refinado en otros trabajos), para que no se produzca ninguno de estos desastres la densidad de energía oscura, ρ_Λ, debe estar dentro de un estrecho rango: si es positiva, como mucho puede de ser 100 veces mayor que la densidad de materia (ordinaria y oscura), ρ_M; y si es negativa, como mucho 10 veces (en valor absoluto). En otras palabras, el rango aceptable para la densidad de energía oscura es: $-10\,\rho_M < \rho_\Lambda < 100\,\rho_M$. Por supuesto, la densidad real de la energía oscura está dentro de este rango. Recordemos que la energía oscura supone aproximadamente el 68% de la densidad total del universo, mientras que la densidad de materia supone el 32% (suma del 5% de materia ordinaria y el 27% de materia oscura). Así que en nuestro universo, $\rho_\Lambda = 2{,}2\,\rho_M$, que está dentro del rango anterior.

Ahora pensemos: si nuestro universo fuera el único existente, entonces el principio antrópico no explicaría en absoluto el valor de la energía oscura (igual que si la Tierra fuera el único planeta, el principio antrópico no explicaría por qué su distancia al Sol está en el rango adecuado para la vida). Sin embargo, si nuestro universo no es único, sino un elemento de un gran conjunto de

«universos», separados unos de otros y con *características físicas distintas*, entonces el principio antrópico sí podría explicar el valor de la energía oscura que observamos. Recordemos que en la física moderna esperamos muchas contribuciones gigantescas —de signo positivo y negativo— a la energía oscura. Típicamente eso conduce a un valor demasiado grande (positivo o negativo) de la densidad de energía oscura, lo que significa que en la mayoría de esos hipotéticos universos la magnitud de la energía oscura será excesiva, por lo que no serán aptos para el surgimiento de la vida. Pero en una pequeña fracción de ellos se producirá una cancelación casi perfecta entre las diversas contribuciones, de forma que la energía oscura residual será pequeña y estará dentro del rango anterior: $-10\,\rho_M < \rho_\Lambda < 100\,\rho_M$. Solo en esos raros universos podrá surgir la vida, y con ella, observadores que contemplen su propio universo. Notemos que en la mayoría de esos universos privilegiados, la densidad de energía oscura será pequeña pero no exactamente cero, sino que tendrá un valor cualquiera dentro del rango aceptable para la vida. Por eso Weinberg predijo que la densidad de energía oscura sería seguramente distinta de cero, y con una magnitud no muy diferente a la densidad de materia, ¡y acertó!

Es importante tener claro que, para que el argumento antrópico funcione hace falta un gran conjunto de universos con características físicas distintas, concretamente con valores distintos de la densidad de energía oscura. Este hipotético conjunto de universos es lo que se ha venido en llamar *multiverso*. La palabra «multiverso» puede resultar equívoca. Si definimos el universo como «todo lo que hay», está claro que la noción de multiverso carece de sentido, ya que ese conjunto de «universos» constituiría el auténtico y único universo. Es una cuestión de pura terminología. Cuando se habla de multiverso, lo que se quiere indicar es que el universo podría tener regiones desligadas unas de otras, en el sentido de que no pueden verse ni influirse entre ellas. Esas regiones podrían tener características físicas distintas, concretamente distintas densidades de energía oscura. Desde el punto de vista de los pobladores de una de ellas, la región en cuestión sería todo lo que es posible observar, y por tanto constituiría «su» universo, si bien la realidad es que habría otras regiones o «universos» invisibles para ellos.

Una burbuja en el océano

¿Cómo podría llegarse a una situación de multiverso? Lo cierto es que no es tan raro. Unas páginas atrás descubrimos que en un futuro lejano, nuestro grupo de galaxias quedará totalmente desconectado del resto de galaxias, las cuales habrán salido de «nuestro horizonte», por lo que serán totalmente invisibles a todos los efectos. El universo entero se «desgajará» en regiones desconectadas unas de otras, una infinidad de universos-isla que contendrán solo un grupo de galaxias. Lo que actualmente contemplamos como un único universo se habrá transformado en un multiverso.

Existe la posibilidad de que un proceso semejante tuviera lugar al comienzo del universo, pero con una energía del vacío mucho mayor que la actual. En ese caso, el universo se habría expandido inicialmente de forma vertiginosa, multiplicando su tamaño cuatrillones de cuatrillones de veces en una fracción de segundo. Un escenario de este tipo se denomina *universo inflacionario* (por analogía con una inflación monetaria desbocada), y es una de las hipótesis más serias acerca de lo que aconteció en los primerísimos instantes del universo. La energía del vacío capaz de originar aquel hipotético proceso de inflación pudo provenir del valor inicial de un campo, semejante al campo de Higgs. La idea es que ese campo (llamado *inflatón* en la jerga de los físicos) tendría inicialmente un valor que no era el que minimizaba su energía asociada. Una situación así se denomina de *falso vacío*, ya que el campo puede durar un cierto tiempo en ese estado, pero finalmente terminará por caer a su valor natural (el que minimiza su energía). Es como una pelota en lo alto de una cúpula. Durante unos instantes puede mantenerse en la cúspide, pero después rodará hacia la base de la cúpula, donde su energía potencial es mínima. En el caso del inflatón, esos breves instantes «en lo alto de la cúpula» tu-

vieron consecuencias trascendentales. Fue entonces cuando se produjo el proceso de inflación primitiva, el cual pudo generar un multiverso. Al igual que sucederá algún día con nuestro universo (a un ritmo mucho más lento), durante aquella inflación vertiginosa muchas regiones del espacio quedaron desconectadas unas de otras. Después el campo cayó a su valor natural, pero podría suceder que hubiera muchos valores naturales posibles. Imaginemos, en nuestro ejemplo de la pelota, que la base de nuestra cúpula está colocada sobre un terreno desigual. La pelota rodará desde lo alto en una dirección cualquiera, pero al llegar a la base resultará que su altura final no será la misma si cae en una dirección o en otra: habrá pequeñas diferencias relacionadas con las desigualdades del terreno en la base de la cúpula. Análogamente, en nuestro universo inflacionario el inflatón caería en una dirección aleatoria, que podría ser distinta en cada región desconectada de las demás. Como consecuencia, en cada región el valor final de la energía del vacío (o sea, la energía oscura) sería diferente. De esta forma, se habría generado un multiverso como el que necesitamos para explicar el valor observado de la energía oscura.

Unos comentarios sobre el mecanismo de la inflación y el multiverso a que puede dar lugar. El modelo de universo inflacionario fue propuesto en 1981 por Alan Guth para explicar algunos aspectos intrigantes de nuestro universo. Por ejemplo, una predicción sobresaliente del universo inflacionario es que, una vez que el inflatón cae a su valor mínimo, la energía almacenada en el campo se convierte en materia y radiación convencionales. Se puede demostrar que la densidad final de materia y energía coincide con la densidad crítica, p_c. Esto supone un gran éxito, ya que ese es precisamente el valor que se observa. Es interesante mencionar que el modelo teórico de la inflación fue desarrollado mucho antes del descubrimiento de la energía oscura. Ahora sabemos que, curiosamente, el universo actual está experimentando un auténtico proceso inflacionario (producido por la energía oscura), solo que mucho más suave que el que supuestamente tuvo lugar en los comienzos del universo. Por último, un escenario del tipo anterior, en el que el universo se infla y tiene muchos estados finales a los



La zona sombreada representa una zona del universo durante un proceso de expansión inflacionaria eterna, que conduce a una situación de multiverso. Las burbujas de vacío verdadero que se crean continuamente son universos, desgajados unos de otros, y posiblemente con características físicas distintas.

que «caer» con características físicas distintas, se da naturalmente en las teorías de supercuerdas. Recordemos que estas teorías fueron construidas con un objetivo diferente, concretamente la consistencia matemática de la gravitación a nivel cuántico. Resulta muy sugerente que de forma natural puedan conducir a la generación de un multiverso. No obstante, hay que decir que este es un tema polémico dentro de la comunidad científica.

Un hecho muy interesante es que en muchos casos, el proceso inflacionario puede continuar eternamente. Esto está ilustrado en la figura 5. En ella vemos una zona del universo (sombreada) en la que el inflatón está en situación de falso vacío. Por tanto, esa zona está inflándose vertiginosamente. En algunos puntos, de forma aleatoria, se forman burbujas de vacío verdadero, en las que el inflatón adquiere un valor que minimiza su energía. Cada burbuja corresponde a un universo convencional, y el conjunto de las burbujas sería el multiverso. Estas burbujas se expanden a la velocidad de la luz, pero el espacio entre ellas crece aún más rápido, de forma que las burbujas nunca llegan a llenar todo el espacio. Sin embargo, en ese espacio intermedio se siguen generando nuevas burbujas. Nuestro universo sería simplemente una de esas burbujas que se enciende y se apaga, si bien la producción

de burbujas (es decir, de universos desconectados del nuestro) continúa eternamente. Si las cosas son así, el futuro del universo global es mucho menos deprimente que el destino al que está abocado nuestro universo-burbuja particular.

La idea del principio antrópico asociada al multiverso para explicar la energía oscura es controvertida. A muchos físicos teóricos (¡incluido Weinberg!) no les gusta, porque de alguna manera supone renunciar a entender de manera profunda un aspecto sorprendente de la naturaleza. Sin embargo, guste o no guste, la idea podría ser correcta. De hecho se ha especulado que el multiverso podría proporcionar también la explicación a otros aspectos intrigantes de las leyes físicas que nos gobiernan, y que parecen «diseñados» para que la vida pueda surgir. Es importante señalar que el multiverso no es una noción mística, sino todo lo contrario: proporciona una posible explicación racional a características de la naturaleza que parecen diseñadas a propósito. En ese sentido se parece a la idea de la selección natural de Darwin: los seres vivos son tan sofisticados que parecen diseñados a propósito para realizar sus funciones. Sin embargo, ese aparente diseño es en realidad la consecuencia de muchas mutaciones aleatorias a lo largo de millones de años, de las que solo las más favorables han sido seleccionadas. En cualquier caso, no hay que olvidar que, ahora mismo, la explicación de la energía oscura basada en la noción de multiverso es solo una interesante especulación sobre la que se sigue investigando.

A lo largo de este libro hemos descrito los esfuerzos teóricos y experimentales para comprender la materia y la energía oscuras. Se ha avanzado mucho, pero seguimos sin comprender su naturaleza ni el porqué de su existencia. Estos misteriosos ingredientes del universo siguen desafiando el ingenio y la curiosidad humana, al igual que en su momento lo hicieron la estructura atómica, la naturaleza de las estrellas o el origen del universo. Y, como sucedió en aquellos casos, ese desafío representa una gran oportunidad para desvelar los secretos más íntimos de la naturaleza.

Feynman, R.P., *Electrodinámica cuántica. La extraña teoría de la luz y la materia*, Madrid, Alianza Universidad, 2004.
—: *El carácter de la ley física*, Barcelona, Tusquets Editores, 2000.
Greene, B., *El universo elegante*, Barcelona, Booket, 2012.
Guth, A., *El universo inflacionario*, Barcelona, Debate, 1999.
Hogan, C.J., Rees M., *El libro del Big Bang. Introducción a la cosmología*, Madrid, Alianza Editorial, 2005
Sagan, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
Susskind, L., *El paisaje cósmico. Teorías de cuerdas y el mito del diseño inteligente*, Barcelona, Editorial Crítica, 2007.
Weinberg, S., *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*, Barcelona, Editorial Crítica, 2010.
—: *Los tres primeros minutos del universo*, Madrid, Alianza Editorial, 2009.